

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Estudio experimental del comportamiento de un contador digital en presencia de armónicos.

Autor: Fernando Fuentes Sevillano

Tutor: Pedro L. Cruz Romero

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018





# **Estudio experimental del comportamiento de un contador digital en presencia de armónicos.**

Autor:

Fernando Fuentes Sevillano

Tutor:

Pedro L. Cruz Romero

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018





Proyecto Fin de Carrera: Estudio experimental del comportamiento de un contador digital en presencia de armónicos.

Autor: Fernando Fuentes Sevillano

Tutor: Pedro L. Cruz Romero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

# Agradecimientos

---

En primer lugar quisiera agradecer la ayuda de mi tutor Pedro L. Cruz Romero, por darme la oportunidad de realizar este trabajo y el cual me ha guiado durante todo el desarrollo del mismo, así como al personal del laboratorio.

A mi familia, principalmente a mis padres Fernando y M<sup>a</sup> Carmen y a mi hermana Belén, por haber estado junto a mí durante toda mi vida, por enseñarme aquello que no se puede enseñar en los colegios y a ayudarme a crecer como persona, sin ellos nada de esto habría sido posible. Un recuerdo especial para los que ya no están.

A todos los profesores que he tenido a lo largo de los años, de los cuales siempre ha quedado algo.

Una mención para mis amigos, con los que tanto he compartido, tanto semanas de intenso estudio como viajes y fines de semana inolvidables.

Gracias también a mis compañeros de piso y de residencia, los cuales me han hecho sentir como en casa durante estos cuatro años, a pesar de estar a kilómetros de ella.

*Fernando Fuentes Sevillano*

*Sevilla, 2018*



# Resumen

---

El objetivo del trabajo en cuestión es probar el correcto funcionamiento del contador monofásico CERM1, poniendo especial énfasis en el comportamiento ante corrientes armónicas.

Para ello se han desarrollado varias pruebas sometiendo el instrumento a cargas lineales y no lineales, y se ha comparado la información mostrada por el aparato con la obtenida mediante el procesamiento de las señales obtenidas con un osciloscopio en el software de programación LabVIEW.



# Abstract

---

The objective of this study is to test the proper operation of the CERM1 meter box, especially under current harmonics.

To achieve that some experiments have been designed in the laboratory. In these experiments the meter box has been connected to both linear and non-linear loads, and the information given by this instrument has been compared with the results given by the software LabVIEW based on the signals of an oscilloscope.





# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Objetivo del proyecto</b>	<b>1</b>
<b>2 Teoría de armónicos</b>	<b>2</b>
2.1 <i>Los armónicos</i>	2
2.2 <i>Causas</i>	4
2.3 <i>Efectos</i>	4
2.4 <i>Soluciones</i>	5
2.5 <i>Normativa</i>	5
2.5.1 IEEE 519-2014	5
2.5.2 IEC 61000	7
2.6 <i>REAL DECRETO 889/2006</i>	11
<b>3 Cálculo de la potencia y la energía eléctrica</b>	<b>14</b>
<b>4 El contador CERM1</b>	<b>16</b>
<b>5 LabVIEW</b>	<b>18</b>
5.1 <i>VI para el cálculo de la potencia en LabVIEW</i>	19
<b>6 El osciloscopio Tektronix TDS1001C-EDU</b>	<b>24</b>
6.1 <i>Osciloscopio en LabVIEW</i>	25
6.2 <i>Caracterización metrológica del osciloscopio.</i>	27
<b>7 Montaje en el laboratorio</b>	<b>32</b>
7.1 <i>Medida de tension.</i>	32
7.2 <i>Medida de intensidad.</i>	35
<b>8 Incertidumbre de las medidas experimentales</b>	<b>36</b>
8.1 <i>Incertidumbre en este experimento.</i>	37
<b>9 Experimento A</b>	<b>40</b>
9.1 <i>Calefactor</i>	40
9.1.1 <i>Posición A</i>	41
9.1.2 <i>Posición B</i>	42
9.2 <i>Resistencias en serie</i>	44
9.3 <i>Resistencias en serie con rectificador de media onda</i>	45
9.4 <i>Torre de ordenador</i>	47

9.5	<i>Torre de ordenador y resistencias con rectificador de media onda</i>	50
9.6	<i>Torre de ordenador y portátil</i>	52
9.7	<i>Torre de ordenador, portátil y calefactor.</i>	54
<b>10</b>	<b>Experimento B</b>	<b>56</b>
10.1.	<i>Torre de ordenador.</i>	57
10.2.	<i>Torre de ordenador y 6 resistencias.</i>	58
10.3.	<i>Torre de ordenador y 5 resistencias.</i>	59
10.4.	<i>Torre de ordenador y 4 resistencias.</i>	60
10.5.	<i>Torre de ordenador y 3 resistencias.</i>	61
10.6.	<i>Torre de ordenador y 2 resistencias.</i>	62
10.7.	<i>Torre de ordenador y 1 resistencia.</i>	63
10.8.	<i>Gráficas del experimento B.</i>	64
<b>11</b>	<b>Discusión de los resultados</b>	<b>66</b>
11.1	<i>Experimento A.</i>	67
11.2	<i>Experimento B.</i>	69
11.3	<i>Conclusión y observaciones.</i>	70
<b>Anexo A.</b>	<b>Capturas del experimento B</b>	<b>72</b>
<b>Referencias</b>		<b>75</b>
<b>Bibliografía</b>		<b>76</b>
<b>Webgrafía</b>		<b>78</b>
<b>Glosario</b>		<b>79</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Normativa de tensión según el IEEE.	6
Tabla 2-2. Normativa 1 de intensidad según el IEEE.	6
Tabla 2-3. Normativa 2 de intensidad según el IEEE.	7
Tabla 2-4. Normativa 2 de intensidad según el IEEE.	7
Tabla 2-5. IEC 61000-2-2	8
Tabla 2-6. IEC 61000 Límites en clase A.	9
Tabla 2-7. IEC 61000 Límites en clase B.	10
Tabla 2-8. IEC 61000 Límites en clase C	10
Tabla 2-9. IEC 61000 Límites en clase D.	11
Tabla 2-10. Tabla 1 del RD 889/2006.	12
Tabla 2-11. Tabla 2 del RD 889/2006.	12
Tabla 2-12. Tabla 3 del RD 889/2006.	13
Tabla 6-1. Tensiones en generador de ondas y LabVIEW.	29
Tabla 6-2. Tensiones en multímetro y LabVIEW.	30
Tabla 7-1. Error en porcentaje con cada par de resistencias.	34
Tabla 8-1. Ejemplo de presentación de medidas.	39
Tabla 9-1. Lecturas en experimento A, calefactor 1000W.	42
Tabla 9-2. Medidas en experimento A, calefactor 1000W.	42
Tabla 9-3. Lecturas en experimento A, calefactor 2000W.	43
Tabla 9-4. Medidas en experimento A, calefactor 2000W.	43
Tabla 9-5. Lecturas en experimento A, resistencias en serie.	45
Tabla 9-6. Medidas en experimento A, resistencias en serie.	45
Tabla 9-7. Lecturas en experimento A, resistencias en serie con rectificador de media onda.	47
Tabla 9-8. Medidas en experimento A, resistencias en serie con rectificador de media onda.	47
Tabla 9-9. Lecturas en experimento A, torre de ordenador.	49
Tabla 9-10. Medidas en experimento A, torre de ordenador.	49
Tabla 9-11. Lecturas en experimento A, torre de ordenador y resistencias con rectificador de media onda.	51
Tabla 9-12. Medidas en experimento A, torre de ordenador y resistencias con rectificador de media onda.	51
Tabla 9-13. Lecturas en experimento A, torre de ordenador y portátil.	53
Tabla 9-14. Medidas en experimento A, torre de ordenador y portátil.	53
Tabla 9-15 Lecturas en experimento A, torre de ordenador, portátil y calefactor.	55
Tabla 9-16. Medidas en experimento A, , torre de ordenador, portátil y calefactor.	55
Tabla 10-1. Lecturas en experimento B, 0 resistencias.	57

Tabla 10-2. Medidas en experimento B, 0 resistencias.	57
Tabla 10-3. Lecturas en experimento B, 6 resistencias.	58
Tabla 10-4. Medidas en experimento B, 6 resistencias.	58
Tabla 10-5. Lecturas en experimento B, 5 resistencias.	59
Tabla 10-6. Medidas en experimento B, 5 resistencias.	59
Tabla 10-7. Lecturas en experimento B, 4 resistencias.	60
Tabla 10-8. Medidas en experimento B, 4 resistencias.	60
Tabla 10-9. Lecturas en experimento B, 3 resistencias.	61
Tabla 10-10. Medidas en experimento B, 3 resistencias.	61
Tabla 10-11. Lecturas en experimento B, 2 resistencias.	62
Tabla 10-12. Medidas en experimento B, 2 resistencias.	62
Tabla 10-13. Lecturas en experimento B, 1 resistencia.	63
Tabla 10-14. Medidas en experimento B, 1 resistencia.	63

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Contador objetivo del proyecto.	1
Figura 2-1. Onda y transformada de Fourier en Matlab.	3
Figura 2-2. Gráfica espectro armónico de intensidad.	3
Figura 3-1. Tensión de la red eléctrica en España	15
Figura 4-1 El contador CERM 1.	16
Figura 5-1. Señales en LabVIEW.	18
Figura 5-2. Obtención de parámetros en LV.	19
Figura 5-3. Superposición de señales.	19
Figura 5-4. Extract Single Tone Information VI.	19
Figura 5-5. Cluster de frecuencias.	20
Figura 5-6. Contribución de armónico n a la potencia	20
Figura 5-7. Bucle de cálculo de la potencia.	21
Figura 5-8. Multitone Generator VI y vectores de características.	21
Figura 5-9. Vector de características de I para la prueba virtual.	22
Figura 5-10. Panel frontal durante la prueba virtual.	23
Figura 6-0. Osciloscopio.	24
Figura 6-1. Bloque de inicialización.	25
Figura 6-2. Bloque autoseup	25
Figura 6-3. Bloque de configuración de adquisición automática.	25
Figura 6-4. Bloque de recuperación de la forma de onda.	25
Figura 6-5. Bloque de error.	26
Figura 6-6. Bloque close.	26
Figura 6-7. Panel frontal, área de configuración.	26
Figura 6-8. Bloque configure channel.	27
Figura 6-9. Bloque de tiempo.	27
Figura 6-10. Bloque de adquisición de varias ondas.	27
Figura 6-11. Generador TG10101A	28
Figura 6-12. Instrumento Virtual de adquisición de onda de tensión.	28
Figura 7-1. Esquema del montaje en laboratorio.	32
Figura 7-2. Sonda de tensión.	33
Figura 7-3. Multímetro de precisión Fluke 8845A midiendo R.	34
Figura 7-4. Sonda de intensidad.	35
Figura 8-1. Hoja de cálculo para la obtención de incertidumbres.	38
Figura 9-0. Calefactor empleado.	40

Figura 9-1. Panel frontal experimento A, calefactor 1000W.	41
Figura 9-2. Tensión e Intensidad(x100) frente a tiempo y espectro armónico de intensidad en experimento A, calefactor 1000W.	41
Figura 9-3. Panel frontal experimento A, calefactor 2000W.	43
Figura 9-4. Resistencias de 122 ohmios.	44
Figura 9-5. Panel frontal experimento A, resistencias en serie.	44
Figura 9-6. Resistencias con rectificador de media onda.	46
Figura 9-7. Panel frontal experimento A, resistencias con rectificador de media onda.	46
Figura 9-8. Tensión e Intensidad(x100) frente a tiempo y espectro armónico de intensidad en experimento A, resistencias con rectificador de media onda.	46
Figura 9-9. Panel frontal experimento A, torre de ordenador.	48
Figura 9-10. Tensión e Intensidad(x100) frente a tiempo y espectro armónico de intensidad en experimento A, torre de ordenador.	48
Figura 9-11. Panel frontal experimento A, torre de ordenador y resistencias con rectificador de media onda.	50
Figura 9-12. Tensión e Intensidad(x100) frente a tiempo y espectro armónico de intensidad en experimento A, torre de ordenador y resistencias con rectificador de media onda.	50
Figura 9-13. Panel frontal experimento A, torre de ordenador y portátil.	52
Figura 9-14. Tensión e Intensidad(x100) frente a tiempo y espectro armónico de intensidad en experimento A, torre de ordenador y portátil.	52
Figura 9-15. Panel frontal experimento A, torre de ordenador, portátil y calefactor.	54
Figura 9-16. Tensión e Intensidad(x100) frente a tiempo y espectro armónico de intensidad en experimento A, torre de ordenador, portátil y calefactor.	54
Figura 10-1. Banco de resistencias del experimento B.	56
Figura 10-2. Experimento B con 6 resistencias.	64
Figura 10-3. Experimento B con 5 resistencias.	64
Figura 10-4. Experimento B con 4 resistencias.	64
Figura 10-5. Experimento B con 3 resistencias.	65
Figura 10-6. Experimento B con 2 resistencias.	65
Figura 10-7. Experimento B con 1 resistencia.	65
Figura 11-1. Gráfica $\Delta P/P$ -THDi del experimento A.	67
Figura 11-2. Gráfica $\Delta P/P$ -P <sub>LabVIEW</sub> del experimento A.	68
Figura 11-3. Gráfica $\Delta P/P$ -THDi del experimento A.	69
Figura 11-4. Gráfica $\Delta P/P$ -P <sub>LabVIEW</sub> del experimento A.	70
Figura A-1. Captura en LabVIEW para ordenador y 6 resistencias.	72
Figura A-2. Captura en LabVIEW para ordenador y 5 resistencias.	72
Figura A-3. Captura en LabVIEW para ordenador y 4 resistencias.	73

Estudio experimental del comportamiento de un contador digital en presencia de armónicos.	xix
Figura A-4. Captura en LabVIEW para ordenador y 3 resistencias.	73
Figura A-5. Captura en LabVIEW para ordenador y 2 resistencias.	73
Figura A-6. Captura en LabVIEW para ordenador y 1 resistencia.	74





# 1 OBJETIVO DEL PROYECTO

---

El objetivo principal del proyecto es comprobar el buen funcionamiento de los contadores de energía eléctrica CERM1 que están siendo instalados en los últimos años. Para ello se ha sometido uno de ellos a varias pruebas con diferentes cargas, unas lineales y otras no lineales y se ha comparado la información ofrecida por el instrumento con la obtenida mediante un osciloscopio y cálculos computacionales en el laboratorio.

Se ha puesto especial interés en comprobar si la presencia de armónicos en la corriente que circula por las cargas produce un incremento del error de estos contadores, ya que es un problema que está cada vez más presente en las instalaciones de baja tensión actuales.



Figura 1-1. Contador objetivo del proyecto.

## 2 TEORÍA DE ARMÓNICOS

---

En primer lugar se ha decidido realizar una búsqueda bibliográfica sobre los armónicos en redes eléctricas, con el objetivo de plasmar de forma resumida las características generales de este problema, así como sus causantes, efectos sobre las instalaciones y los equipos y tecnologías empleadas para corregirlo. Además se ha revisado la legislación a nivel nacional en este campo aplicado a contadores y las directrices a nivel mundial con mayor impacto.

### 2.1 Los armónicos

Si representamos la Tensión o la Intensidad que circula por la red eléctrica en función del tiempo, la forma de la onda será parecida a una senoidal de 50 Hz, pero presentará perturbaciones.

Para analizar y cuantificar estas deformaciones se realiza la transformada de Fourier, que consiste en descomponer la onda como una suma de senoides de distinta frecuencia. El resultado de esta transformada será una senoide de 50 Hz, la componente fundamental; y una serie de senoides de frecuencias múltiplo de 50 Hz que son indeseables al ser las responsables de la distorsión de la fundamental.

Se denomina armónico de orden  $k$  a la senoide de frecuencia  $k \cdot 50$  y su amplitud se suele referir como un tanto por ciento de la componente fundamental, o en valores absolutos.

En la Figura 2-1 del ejemplo se ha representado la transformada de una onda compuesta por una fundamental de 50 Hz y unos armónicos de orden 3 y 5 de amplitudes 20% y 10% de la fundamental respectivamente.

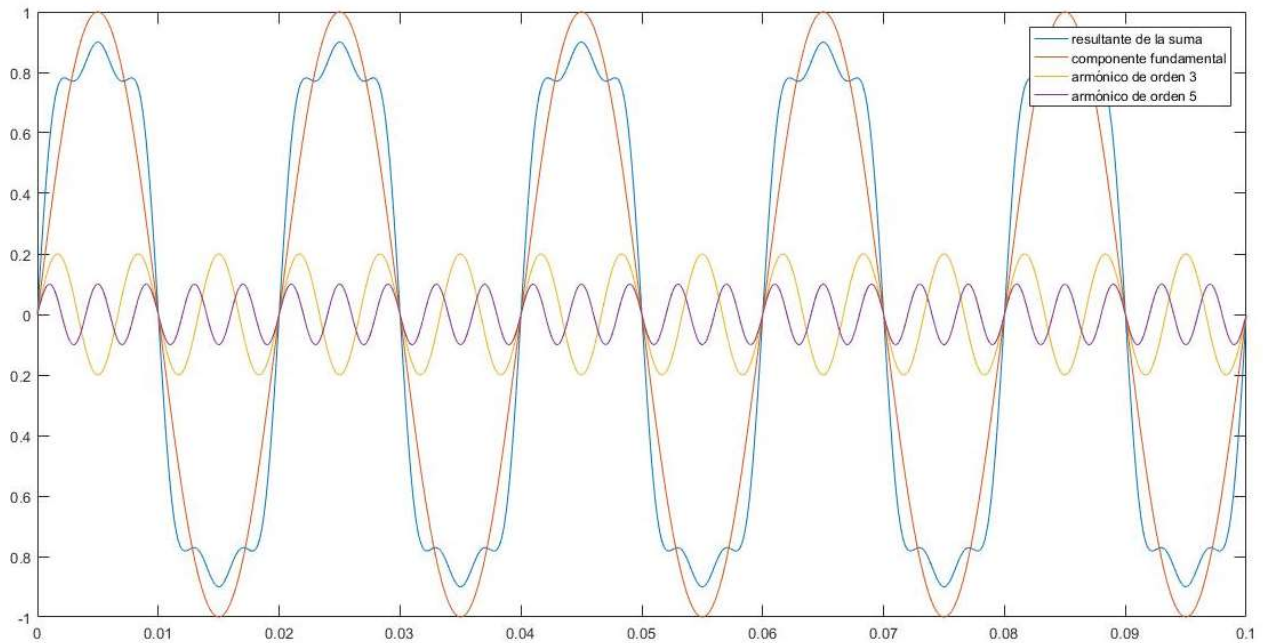


Figura 2-1. Onda y transformada de Fourier en Matlab.

Es habitual representar las componentes de una onda en un gráfico como el de la figura 2-2, amplitud de cada armónico frente al orden.

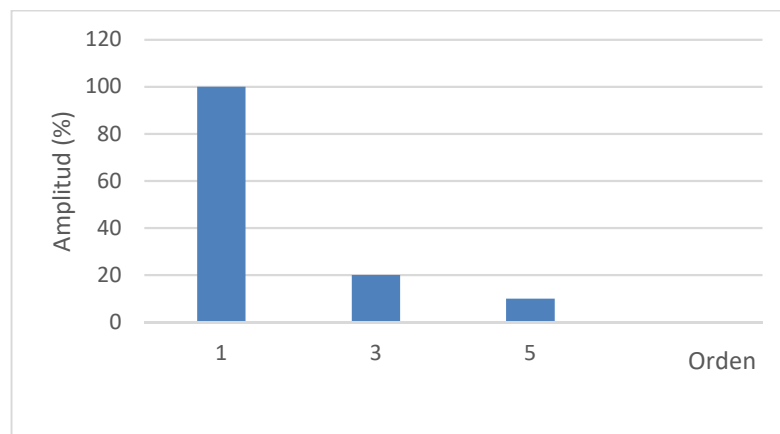


Figura 2-2. Gráfica espectro armónico de intensidad.

Para cuantificar una onda distorsionada se habla del valor eficaz o RMS, que es el valor que tendría una corriente constante para producir el mismo calentamiento que la onda periódica. Se calcula de la siguiente forma:  $I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$

En el estudio de armónicos se emplea frecuentemente la Distorsión Armónica Total o THD (del inglés *Total Harmonic Distortion*), que nos da información sobre la calidad de la onda. Su ecuación

es:  $THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{H_n}{H_1}\right)^2} \cdot 100$  donde n es el orden del armónico. Es el cociente entre el valor de las componentes armónicas y el de la componente fundamental.

## 2.2 Causas

Los armónicos aparecen cuando introducimos una carga no lineal en un circuito, estas son aquéllas en las que la corriente que las atraviesa no es proporcional a la caída de tensión, es decir, son no lineales todas las que no se modelen como capacitancias, inductancias o resistencias. ( $\frac{U}{I} = cte$ )

En la actualidad la presencia de elementos no lineales está aumentando debido a la electrónica de potencia, presente en la gran mayoría de electrodomésticos y ordenadores. Estos dispositivos, al funcionar con corriente continua emplean tiristores que impiden y dejan pasar la corriente de la red de alterna en periodos sucesivos. Las conmutaciones producen una serie de armónicos impares, ya que los rectificadores más comunes son de onda completa y los armónicos pares se anulan en formas de onda simétricas.

Otras cargas no lineales de importancia son los hornos de arco eléctrico, debido a la naturaleza del arco voltaico que se produce en su interior; y las lámparas fluorescentes, que a diferencia de las tradicionales bombillas incandescentes no funcionan como resistencias.

En la instalación eléctrica de transporte y distribución los elementos que generan armónicos fundamentalmente son los transformadores en saturación, cuyos núcleos magnéticos dejan de tener comportamientos lineales, aunque las compañías evitan que trabajen en este estado, y los compensadores estáticos de potencia reactiva.

Los elementos de mando y maniobra también introducen armónicos al abrir y cerrar líneas, así como los posibles fallos.

En la generación las centrales eléctricas convencionales (nucleares, térmicas e hidroeléctricas) utilizan generadores síncronos que suministran ondas senoidales casi perfectas; sin embargo, las fuentes de energía renovables, cada vez más presentes debido a la preocupación medioambiental, introducen armónicos a la red. Por ejemplo, en la generación fotovoltaica hay que transformar la corriente continua producida en el Silicio de las placas en corriente alterna, para lo que se emplean tiristores.

## 2.3 Efectos

Algunos de ellos son el aumento de pérdidas y calentamiento de condensadores, transformadores, motores... destacando la incidencia en el conductor neutro, en el que los armónicos triples se suman produciendo unas sobreintensidades elevadas. Los elementos de protección pueden disparar de forma intempestiva y los cables experimentan un efecto corona proporcional a la frecuencia.

Las fuerzas electrodinámicas pueden causar vibraciones y ruido acústico, principalmente en aparatos electromagnéticos como los motores, en los que el par debido a los campos magnéticos producidos por armónicos hace vibrar la máquina.

En los motores de inducción los armónicos generan unos campos magnéticos que intentan girar el motor a diferentes velocidades, lo que se traduce en pérdidas superiores. Los sistemas electrónicos que emplean el paso por cero de la onda de tensión como referencia pueden experimentar un mal funcionamiento, bloqueándose o perdiendo información cuando esta onda contiene ruido, ya que puede pasar varias veces por cero en el mismo semiciclo.

En sistemas con baja potencia de cortocircuito las luces pueden parpadear, si el ojo humano es capaz de apreciarlo causa malestar o incluso migraña.

Además es posible que afecten a las lecturas en contadores, lo que se traduciría en pérdidas para la compañía eléctrica o en un cargo superior al debido a los consumidores.

## 2.4 Soluciones

Existen filtros pasivos de armónicos, que ofrecen una ruta de baja impedancia para que los armónicos circulen por el filtro a tierra y no pasen al suministro, mientras que para la frecuencia fundamental ofrecen una impedancia elevada. Éstos se conectan en paralelo con la carga y están formados por bobinas y condensadores. Los filtros pueden ser para un armónico en concreto o para una banda de frecuencias.

Otra opción es utilizar filtros activos, que funcionan mediante transistores controlados además de elementos pasivos. Estos dispositivos generan una corriente que se opone a la de los armónicos detectados en un transformador de intensidad, por lo que se adaptan a cambios en la carga o en la generación.

Para eliminar los armónicos triples en el suministro se emplean transformadores con conexión en triángulo. Los transformadores y motores afectados por armónicos deben ser sobredimensionados para evitar una degradación temprana debido al calentamiento que experimentan, y los cables deben estar compuestos por numerosos hilos para evitar el efecto corona.

## 2.5 Normativa

### 2.5.1 IEEE 519-2014

El *Institute of Electrical and Electronic Engineers* es una asociación de ingenieros de diferentes áreas a nivel mundial que tiene como objetivo la estandarización y normalización. Una de sus normas, la IEEE 519-2014, es aplicada por numerosas instituciones en cuanto a emisiones de armónicos, principalmente en EEUU.

La norma aplica límites en régimen estacionario para la peor situación posible en el PCC (*point of common coupling*); este es el punto entre el operador o propietario de la red y un usuario, normalmente un transformador. La responsabilidad de mantener un bajo nivel de armónicos es tanto del operador, que debe variar la impedancia del sistema; como de los usuarios, que deben limitar el ruido que emiten.

Estos límites se recogen en las tablas 2-1 a 2-4.

**Tensión:**

Tensión nominal	Tensión de distorsión de un armónico (%)	THDV total (%)
$V \leq 1\text{kV}$	5	8
$1\text{kV} < V \leq 69\text{kV}$	3	5
$69\text{kV} < V \leq 161\text{kV}$	1.5	2.5
$161\text{kV} < V$	1	1.5

Tabla 2-1. Normativa de tensión según el IEEE.

**Intensidad:**

-Intensidad máxima del armónico  $h$  en % de 120 V a 69 kV:

$I_{cc}/I$	$3 \leq h \leq 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20$	4	2	1.5	0.6	0.3	5
$20 < 50$	7	3.5	2.5	1	0.5	8
$50 < 100$	10	4.5	4	1.5	0.7	12
$100 < 1000$	12	5.5	5	2	1	15
$> 1000$	15	7	6	2.5	1.4	20

Tabla 2-2. Normativa 1 de intensidad según el IEEE.

Donde TDD es la distorsión total de la demanda.

-Intensidad máxima del armónico  $h$  en % de 69 kV a 161 kV:

$I_{cc}/I$	$3 \leq h \leq 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$<20$	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
$20 < 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4
$50 < 100$	5	2.25	2	0.75	0.35	6
$100 < 1000$	6	2.75	2.5	1	0.5	7.5
$>1000$	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10

Tabla 2-3. Normativa 2 de intensidad según el IEEE.

-Intensidad máxima del armónico  $h$  en % en sistemas de más de 161 kV:

$I_{cc}/I$	$3 \leq h \leq 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$<25$	1	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
$25 < 50$	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Tabla 2-4. Normativa 2 de intensidad según el IEEE.

## 2.5.2 IEC 61000

La IEC (*International Electrotechnical Commission*) es un organismo similar al IEEE pero más presente en Europa que también impone límites a la distorsión armónica en la IEC 61000.

Esta norma está dividida en varios capítulos, siendo los que nos interesan los siguientes:

### 1.5.2.1. IEC 61000-2-2

Adaptada en la Unión Europea en la UNE-EN 61000-2-2:2003 [1]. Establece límites para perturbaciones de tensión en niveles menores de 240 V y 415 V en sistemas monofásicos y trifásicos respectivamente. Estos límites son relativamente flexibles, pudiendo ser superados en algunas ocasiones excepcionales, se recogen en la tabla 2-5.

Impares no múltiplos de 3		Impares múltiplos de 3		Pares	
Orden	Tensión (%)	Orden	Tensión (%)	Orden	Tensión (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.2
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+1.3*25/h$				

Tabla 2-5. IEC 61000-2-2

**1.5.2.2. IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4:**

Adaptadas en la Unión Europea en la UNE-EN 61000-3-2:2014 [2] y la CEI 61000-3-4:1998 [3]. Establecen límites para la emisión de corriente armónica en equipos de hasta 16 A y superiores a 16 A respectivamente. Los equipos se clasifican en cuatro categorías según su naturaleza:

Clase A: cargas trifásicas, herramientas fijas, electrodomésticos que no pertenezcan a la clase D, equipos de audio, equipos de atenuación para lámparas incandescentes y el resto de equipos que no se puedan clasificar en el resto de clases.

Clase B: herramientas portátiles y equipos de soldadura de arco eléctrico no profesionales.

Clase C: iluminación.

Clase D: ordenadores y televisores de potencia inferior o igual a 600 W.

Sus límites se recogen en las tablas 2-6 a 2-9.



Límites en clase A:

Orden del armónico	Intensidad máxima (A)
2	1.08
3	2.3
4	0.43
5	1.14
6	0.3
7	0.77
8-40 (pares)	$0.23 \cdot (8/h)$
9	0.4
11	0.33
13	0.21
15-39 (impares)	$0.15 \cdot (15/h)$

Tabla 2-6. IEC 61000 Límites en clase A.

Límites en clase B:

Orden del armónico	Intensidad máxima (A)
2	1.62
3	3.45
4	0.64
5	1.71
6	0.45
7	1.15
8-40 (pares)	$0.34 \cdot (8/h)$
9	0.6
11	0.49
13	0.31
15-39 (impares)	$0.22 \cdot (15/h)$

Tabla 2-7. IEC 61000 Límites en clase B.

Límites en clase C:

Orden del armónico	Intensidad máxima (% de la corriente de entrada)
2	2
3	$30 \cdot (\text{factor de potencia del circuito})$
5	10
7	5
9	7
11-39	3

Tabla 2-8. IEC 61000 Límites en clase C.

Límites en clase D:

Orden del armónico	Intensidad máxima (mA/W)	Intensidad máxima (A)
2	3.4	2.3
5	1.9	1.14
7	1	0.77
9	0.5	0.4
13	0.35	0.33
11-39	3.86/h	Límites en clase A

Tabla 2-9. IEC 61000 Límites en clase D.

## 2.6 REAL DECRETO 889/2006

En cuanto a contadores, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio regula el error que pueden cometer los contadores en cuanto a armónicos según el REAL DECRETO 889/2006, de 21 de julio, por el que se regula el control metrológico del Estado sobre instrumentos de medida. [4]

El fabricante debe especificar el índice de clase del equipo (A, B o C) y una serie de constantes definidas en el RD:

$I_n$  = la intensidad de corriente de referencia especificada para la que ha sido concebido el contador conectado a transformador.

$I_{st}$  = valor mínimo declarado de  $I$  para el que el contador registre la energía eléctrica activa con factor de potencia uno (contadores polifásicos con carga equilibrada).

$I_{mín}$  = valor de  $I$  por encima del cual el margen de error se sitúa dentro de los errores máximos permitidos (contadores polifásicos con carga equilibrada).

$I_{tr}$  = valor de  $I$  por encima del cual el margen de error se sitúa dentro del más pequeño error máximo permitido correspondiente al índice de clase del contador.

$I_{máx}$  = valor máximo de  $I$  para el cual el margen de error se sitúa dentro de los errores máximos permitidos.

$U_n$  = la tensión de referencia especificada.

$f_n$  = la frecuencia de referencia especificada.

Estos valores deben cumplir las condiciones de la tabla 2-10.

		A	B	C
Para contadores conectados directamente	Ist	$\leq 0.05 \cdot I_{tr}$	$\leq 0.04 \cdot I_{tr}$	$\leq 0.04 \cdot I_{tr}$
	Imín	$\leq 0.5 \cdot I_{tr}$	$\leq 0.5 \cdot I_{tr}$	$\leq 0.3 \cdot I_{tr}$
	Imáx	$\geq 50 \cdot I_{tr}$	$\geq 50 \cdot I_{tr}$	$\geq 50 \cdot I_{tr}$
Para contadores conectados a transformador	Ist	$\leq 0.06 \cdot I_{tr}$	$\leq 0.04 \cdot I_{tr}$	$\leq 0.02 \cdot I_{tr}$
	Imín	$\leq 0.4 \cdot I_{tr}$	$\leq 0.2 \cdot I_{tr}^*$	$\leq 0.2 \cdot I_{tr}$
	In	$= 20 \cdot I_{tr}$	$= 20 \cdot I_{tr}$	$= 20 \cdot I_{tr}$
	Imáx	$\geq 1.2 \cdot I_n$	$\geq 1.2 \cdot I_n$	$\geq 1.2 \cdot I_n$

Tabla 2-10. Tabla 1 del RD 889/2006.

\* Para los contadores electromecánicos de la clase B se aplicará  $I_{mín} \leq 0.4 \cdot I_{tr}$ .

Los intervalos de tensión y frecuencia serán, como mínimo, los siguientes:

$$0.9 U_n \leq U \leq 1.1 \cdot U_n$$

$$0.98 f_n \leq f \leq 1.02 \cdot f_n$$

El intervalo de FP será, como mínimo, desde  $\cos\varphi = 0,5$  inductivo hasta  $\cos\varphi = 0,8$  capacitivo.

En estas condiciones y una Temperatura superior a  $-10^\circ\text{C}$  e inferior a  $40^\circ\text{C}$  los errores máximos permitidos en tanto por ciento son los de la tabla 2-11.

	A	B	C
Contadores monofásicos; o polifásicos si funcionan con carga equilibrada			
$I_{mín} \leq I < I_{tr}$	5	2.5	1.3
$I_{tr} \leq I \leq I_{máx}$	4.5	2.5	1
Contadores polifásicos, si funcionan con carga monofásica			
$I_{tr} \leq I \leq I_{máx}$	5	3	1.3

Tabla 2-11. Tabla 2 del RD 889/2006.

En presencia de armónicos de corriente, se permite una mayor flexibilidad al error de los contadores según su clase, como se recoge en la tabla 2-12.

Valores críticos de variación, en porcentaje, para los contadores de la clase:		
A	B	C
1	0.8	0.5

Tabla 2-12. Tabla 3 del RD 889/2006.

### 3 CÁLCULO DE LA POTENCIA Y LA ENERGÍA ELÉCTRICA

La potencia eléctrica se define como la cantidad de energía que absorbe o cede un elemento en un instante de tiempo determinado. En corriente continua para hallar la Potencia solo es necesario multiplicar la tensión entre los terminales del elemento por la intensidad que lo atraviesa ( $P=V \cdot I$ ). En corriente alterna tensión e intensidad son ondas sinusoidales y desfasadas, a diferencia de corriente continua que son constantes, por lo que el cálculo es diferente.

En corriente alterna las formas de onda de tensión e intensidad son:

$$V(t)=V_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$I(t)=I_0 \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi)$$

siendo  $V_0$  e  $I_0$  valores de pico,  $\varphi$  el desfase entre tensión e intensidad y  $\omega=2\pi f$ , con una frecuencia de 50Hz en España.

Si multiplicamos estas expresiones llegamos a:

$$P(t)=V_0 \cdot I_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi)$$

$$P(t)=V_0 \cdot I_0 \cdot \frac{\cos(\varphi) - \cos(2\omega t - \varphi)}{2}$$

Sustituyendo las magnitudes de pico por magnitudes eficaces:

$$P(t)=V_e \cdot I_e \cdot (\cos(\varphi) - \cos(2\omega t - \varphi)) \text{ siendo la potencia activa:}$$

$$\mathbf{P(t)=V_e \cdot I_e \cdot \cos(\varphi)}$$

En presencia de armónicos no existe una señal sinusoidal perfecta de tensión y otra de intensidad, sino que hay una suma de muchas de ellas a diferentes frecuencias como ya se ha explicado. Por eso la potencia es el resultado de la contribución de todas esas ondas:

$$P = \sum_m V_m I_m \cos \varphi_m$$

donde  $V_m$  e  $I_m$  son los valores eficaces de tensión e intensidad del armónico  $m$ .

El valor eficaz de una onda es el valor cuadrático medio de la onda o RMS (del inglés *root mean square*), es decir, es el valor que tendría una onda de corriente continua para producir el mismo calentamiento. Para señales sinusoidales  $V_{RMS} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$ .

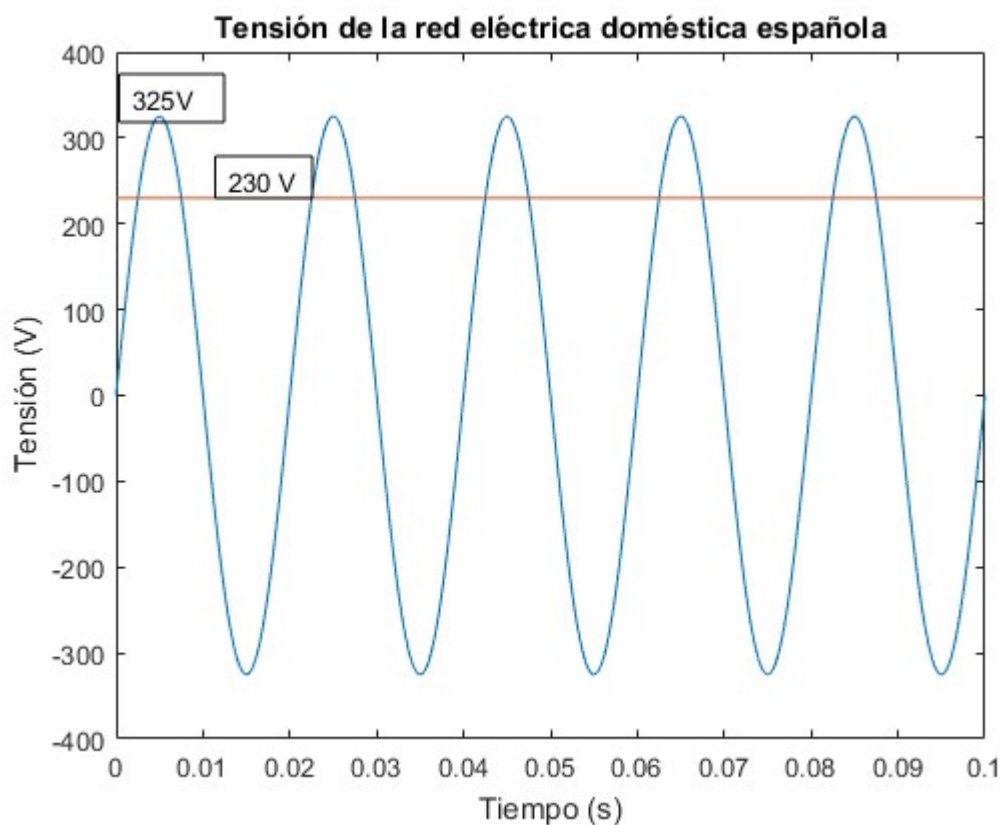


Figura 3-1. Tensión de la red eléctrica en España

En la red de baja tensión española el valor eficaz es 220-240 V, por lo que el valor de pico es de  $230 \cdot \sqrt{2} = 325$  V aproximadamente, como se ha representado en la figura 3-1.

La energía eléctrica es la potencia multiplicada por el tiempo durante el cual está conectada una carga. Se mide en Wh y sus múltiplos y es la medida que tienen en cuenta las compañías para facturar por el suministro eléctrico.

## 4 EL CONTADOR CERM1

El objetivo de este trabajo es la comprobación del correcto funcionamiento del contador monofásico multifunción de telegestión CERM 1 incluso sometido a un gran contenido armónico. Este modelo de contador se empezó a instalar por Endesa en 2010 y se prevé que para 2019 esté en todos los hogares. Los argumentos para cambiar de contador son que permite la discriminación horaria, de forma que se puede pagar menos por kWh si se consume en horas valle; además de conocer el consumo en tiempo real. El Real Decreto 1110/2007, Orden ITC 3860/2007 e IET 290/2012 [5] obliga a las compañías distribuidoras a sustituir los contadores actuales cuya potencia sea menor o igual a 15 kW por los nuevos de telegestión.

Estos contadores se comunican con Endesa, de forma que ya no es necesario que un técnico revise el consumo o que modifique el interruptor de control de potencia al cambiar de potencia contratada, además estos datos se pueden consultar a través de Internet.



Figura 4-1 El contador CERM 1.

El contador dispone de cuatro terminales, el primero y el tercero contando desde la izquierda se



conectan a la fase y al neutro de la red, y el segundo y el cuarto a la fase y al neutro de la instalación que se quiere alimentar. Éstos están protegidos con una tapa que evita el contacto e impide que se puentee, informando a la compañía si es retirada.

En la cara delantera dispone de una pantalla que muestra las medidas instantáneas y otros datos, como la potencia contratada, el periodo tarifario actual o la energía al cierre de los periodos anteriores. Estas medidas las muestra de forma alternativa en diferentes menús que se pueden recorrer con pulsaciones largas o cortas del único botón que tiene. Además, existe un LED que parpadea con diferente frecuencia según el consumo, y un puerto óptico de comunicaciones para los técnicos.

Las medidas que recoge son la potencia y la energía activa en kW y kWh, siendo la última cifra la centésima, por lo que lo mínimo que indica son 10 W y 10Wh; la Intensidad eficaz en A, hasta la décima de Amperio; la Tensión eficaz en V, hasta la décima de Voltio; la energía reactiva y la potencia reactiva, en kVArh y kVAr, y el factor de potencia.

En el manual del contador indica, en el apartado de características metrológicas, que es de clase B según la UNE-EN 50470-3, con  $I_{m\acute{a}x}=60$  A y  $I_{m\acute{i}n}=250$  mA. Según el Real Decreto 889/2006 tratado en el capítulo 2 esto significa que el error no debe superar el 2,5% en el intervalo (0,25A-60A), con una flexibilidad añadida de 0,8% en presencia de armónicos, que sumado al anterior se permite un error de hasta el 3,3%.

## 5 LABVIEW

El osciloscopio que emplearemos descrito en el siguiente capítulo nos ofrece unas formas de onda que es necesario tratar para hallar así la potencia, el espectro armónico y otros datos. Debido al volumen del cálculo necesario lo adecuado es ayudarnos de un ordenador, en el que se ha instalado LabVIEW.

LabVIEW es un software de National Instruments para el desarrollo de sistemas. Usa un lenguaje gráfico que facilita la programación, siendo muy intuitivo y permitiendo la modificación de un programa de forma rápida y sencilla.

Los programas creados en LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales o VI, del inglés *Virtual Instrument*, y poseen dos partes fundamentales e interconectadas entre sí, separadas en dos ventanas. Por una parte, en el panel frontal interactuamos con el programa; pudiendo introducir variables, pulsar botones o girar diales por ejemplo a modo de entradas. En esta ventana se muestran también como salida las variables y gráficas que elijamos. Por otra parte se encuentra el diagrama de bloques, en el que desarrollamos el programa y definimos el comportamiento del mismo.

LabVIEW cuenta con una amplia biblioteca con cualquier función que podamos necesitar, desde multiplicaciones hasta bloques que extraen el espectro armónico de una onda en forma de vector, y ofrece las herramientas para desarrollar aquellas funciones que no vengan instaladas en un principio. Además cuenta con los bucles clásicos en cualquier lenguaje de programación, como el bucle *for*, el bucle *if* y el bucle *while*.

Las distintas señales se identifican con un código de colores que identifican constantes, vectores, booleanos... En el ejemplo de la imagen inferior se aprecia que para las constantes se usa el azul y para las ondas el marrón.



Figura 5-1. Señales en LabVIEW.

En concreto para este trabajo se ha empleado el LabVIEW 2016 básico y los drivers que ofrece National Instruments para los osciloscopios marca Tektronix de la gama TDS 200 1000 2000, que incluye una paleta de funciones para configurar y obtener las señales del osciloscopio.

## 5.1 VI para el cálculo de la potencia en LabVIEW

Antes de conectar el osciloscopio al ordenador portátil se ha desarrollado el programa en LabVIEW que nos permitirá conocer la potencia demandada por las cargas que se conectarán en la experimentación. Este programa además se ha probado con ondas virtuales generadas dentro del propio programa para comprobar que se realizan los cálculos demandados. Dicho programa se detalla a continuación y está basado en la expresión ya mencionada en el capítulo “Cálculo de la potencia y la energía eléctrica”,

$$P = \sum_m V_m I_m \cos \varphi_m$$

En primer lugar se ha tomado la señal de la Tensión y se ha representado gráficamente frente al tiempo. También se ha analizado el espectro armónico, indicando que analice hasta el armónico número 50, se ha representado en una gráfica de barras la amplitud de cada armónico frente al orden, y se ha obtenido la tasa de distorsión armónica (THD). Finalmente se ha colocado un bloque que extrae la frecuencia fundamental de una onda compuesta y su amplitud.

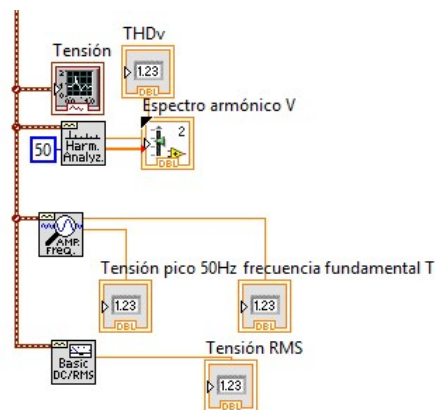


Figura 5-2. Obtención de parámetros en LV.

El fragmento de código de la figura 5-2 pertenece al análisis de la onda de tensión, existiendo otro idéntico para analizar la intensidad. Además se ha considerado de interés superponer en una misma gráfica ambas ondas para apreciar el desfase de tensión e intensidad con los bloques de la figura 5-3.

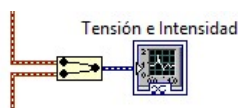


Figura 5-3. Superposición de señales.

Según la expresión para calcular la potencia será necesario descomponer tensión e intensidad en sus componentes armónicas, para lo que se ha empleado el bloque *Extract Single Tone Information VI*.

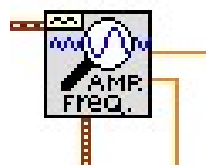
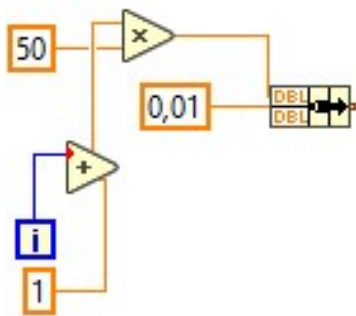


Figura 5-4.  
Extract Single Tone  
Information VI.

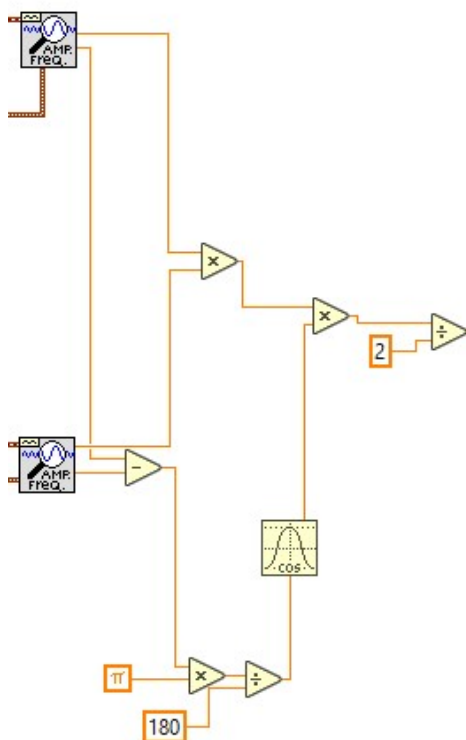
Es el que ya ha sido utilizado para extraer la frecuencia y amplitud fundamentales, pero en esta ocasión le indicaremos con un vector la frecuencia a la que queremos obtener la componente y en qué franja. Como salida necesitaremos la amplitud y la fase.



El vector con la frecuencia se ha definido mediante un *cluster*, este une la amplitud de la franja en la que debe buscar el bloque anterior, que se ha fijado en 0,01. Para recorrer los armónicos desde el fundamental hasta  $n=50$  se ha definido un bucle *for* que irá sumando el número de iteración a 1 y multiplicará el resultado por 50, así en la iteración  $i$  se analizará el armónico de frecuencia  $50 \cdot i$ .

Figura 5-5. Cluster de frecuencias.

Para el armónico  $n$  el fragmento de código que calcula la contribución de éste a la potencia es el de la figura 5-6.



Las amplitudes de las ondas de tensión e intensidad extraídas por el bloque *Extract Single Tone Information VI* se multiplican entre sí y el coseno del desfase entre ambas componentes. Cabe destacar que la función coseno de LabVIEW opera en radianes y la fase a la salida del bloque mencionado está en grados, por lo que será necesario realizar la conversión correspondiente.

Además el producto hay que dividirlo por 2, ya que son dos magnitudes pico de las que necesitamos sus magnitudes RMS, debemos dividir dos veces por raíz de 2.

Figura 5-6. Contribución de armónico  $n$  a la potencia

Todo el cálculo de la potencia quedaría como se puede ver en la figura 5-7.

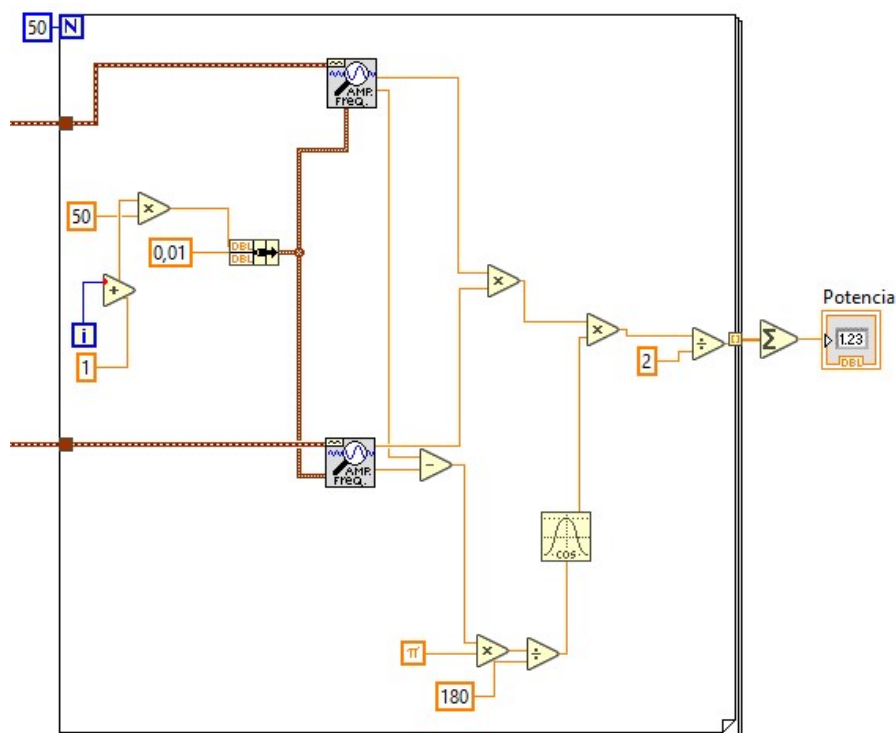


Figura 5-7. Bucle de cálculo de la potencia.

Como podemos ver, a la salida del bucle *for* de 50 iteraciones se suman las contribuciones de cada armónico a la potencia total y mostramos en el panel frontal el resultado.

Para comprobar el correcto comportamiento del código se ha creado de forma virtual sendas ondas de valores similares a los de una vivienda y con armónicos.

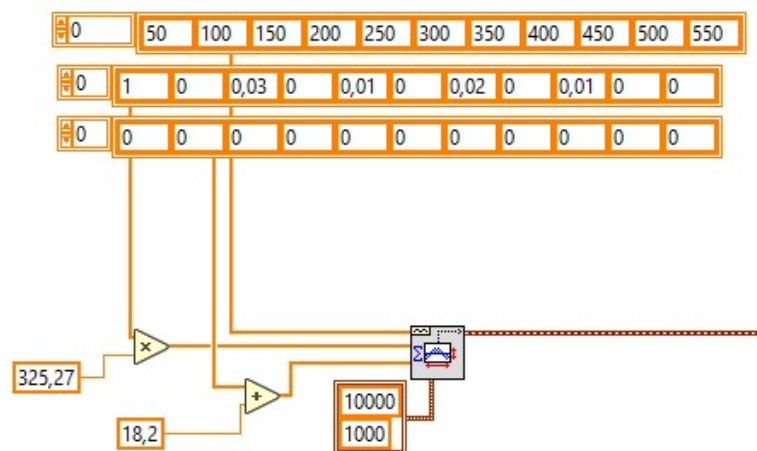


Figura 5-8. Multitone Generator VI y vectores de características.

Estas se han creado con el bloque *Multitone Generator VI* de la figura 5-8, a este entran tres vectores

con las características de la onda, para reducir el cálculo a mano se ha definido ondas de hasta el armónico 11.

El primer vector contiene las frecuencias de cada componente, comenzando en el fundamental de 50 Hz hasta el de 550 Hz. El segundo indica las amplitudes, al ser la tensión de red bastante estable los armónicos de tensión se han establecido en 3% para el  $n=3$ , 1% para el  $n=5$ , 2% para el  $n=7$  y 1% para el  $n=9$ ; la tensión de pico se ha fijado en 325,27, cuyo valor RMS sería 230 V. El último vector contiene las fases, para facilitar el cálculo y poder extraer factor común el factor de potencia se ha definido el mismo valor para todos,  $18,2^\circ$  que correspondería a un factor de potencia de 0,95.

También hay que introducir la información de muestreo, que debe ser lo suficientemente grande para obtener ondas con buena definición. Se ha empleado 10000 puntos por segundo y 1000 muestras en la onda, por lo que el tiempo de la onda será  $1000/10000=0,1$  segundos.

La onda de intensidad se ha definido de la misma manera, la intensidad de pico del fundamental 27 A, correspondientes a una I RMS de 19,1 A; y la intensidad del armónico de orden 3 del 90%, para el  $n=5$  del 40%, para el  $n=7$  del 60%, para el  $n=9$  del 20% y para el  $n=11$  del 30%.

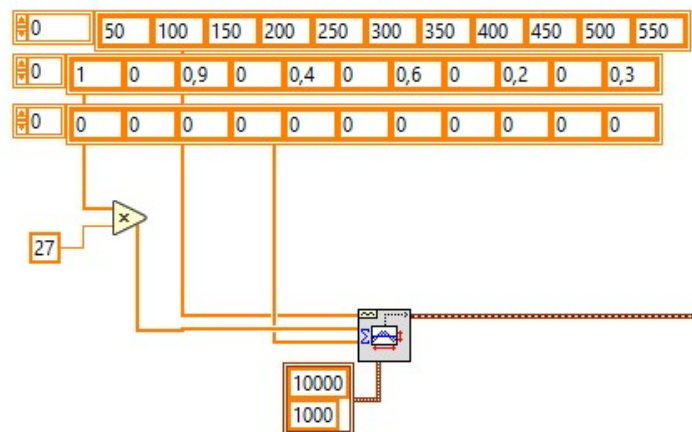


Figura 5-9. Vector de características de I para la prueba virtual.

Se ha simulado el código y las gráficas y magnitudes quedan en el panel frontal como se puede ver en la figura 5-10.

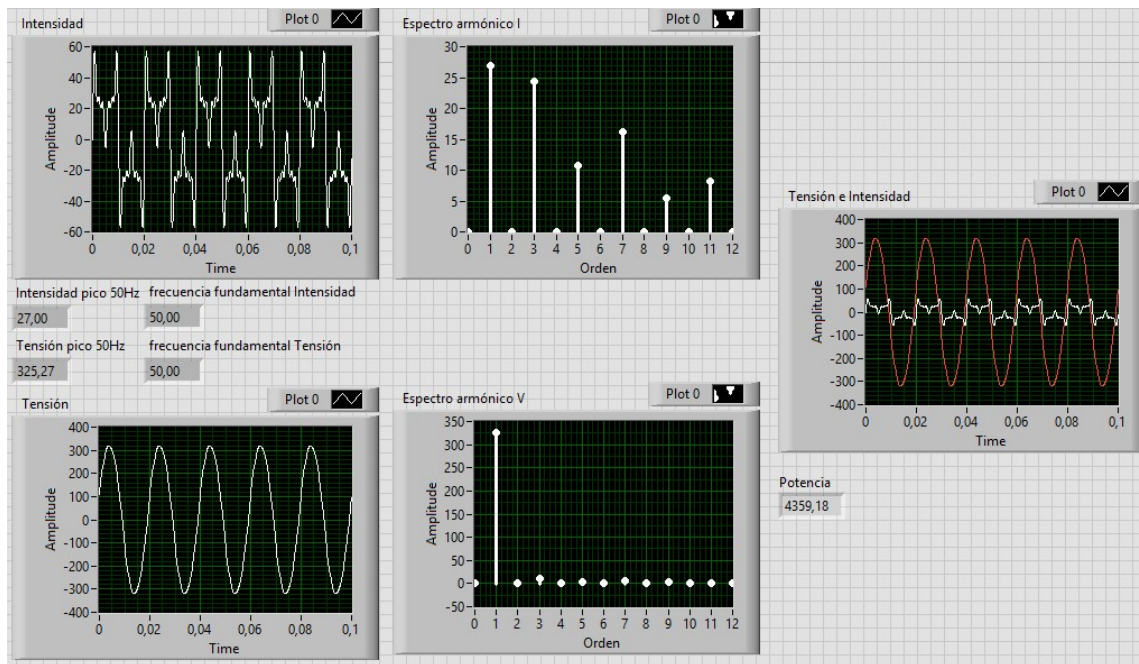


Figura 5-10. Panel frontal durante la prueba virtual.

Se puede apreciar que se han creado las ondas como hemos definido. Destaca que la tensión es bastante perfecta, mientras que la intensidad está muy distorsionada, ya que hemos definido armónicos muy elevados, principalmente el de orden 3 que es del 90%.

La potencia indicada es 4359,18 W, que hemos calculado manualmente mediante la fórmula del principio de este capítulo y queda de la siguiente manera, extrayendo como factores comunes tensión, intensidad y factor de potencia y dejando en tantos por uno las magnitudes:

$$P = 27 \cdot 325,27 \cdot 0,95 \cdot \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} \cdot (1 \cdot 1 + 0,9 \cdot 0,03 + 0,4 \cdot 0,01 + 0,6 \cdot 0,02 + 0,2 \cdot 0,01 + 0,3 \cdot 0) = 4359,31 \text{ W}$$

El cálculo a mano da un resultado similar pero no exacto al obtenido mediante LabVIEW debido a errores de redondeo.



## 6 EL OSCILOSCOPIO TEKTRONIX TDS1001C-EDU

Para obtener las señales de tensión e intensidad se ha optado por el osciloscopio de la marca Tektronix modelo TDS1001C-EDU disponible en el laboratorio. Se trata de un modelo diseñado para universidades, pero es similar a todos los de la misma marca. Tiene un ancho de banda de 100 MHz y muestreo en tiempo real.

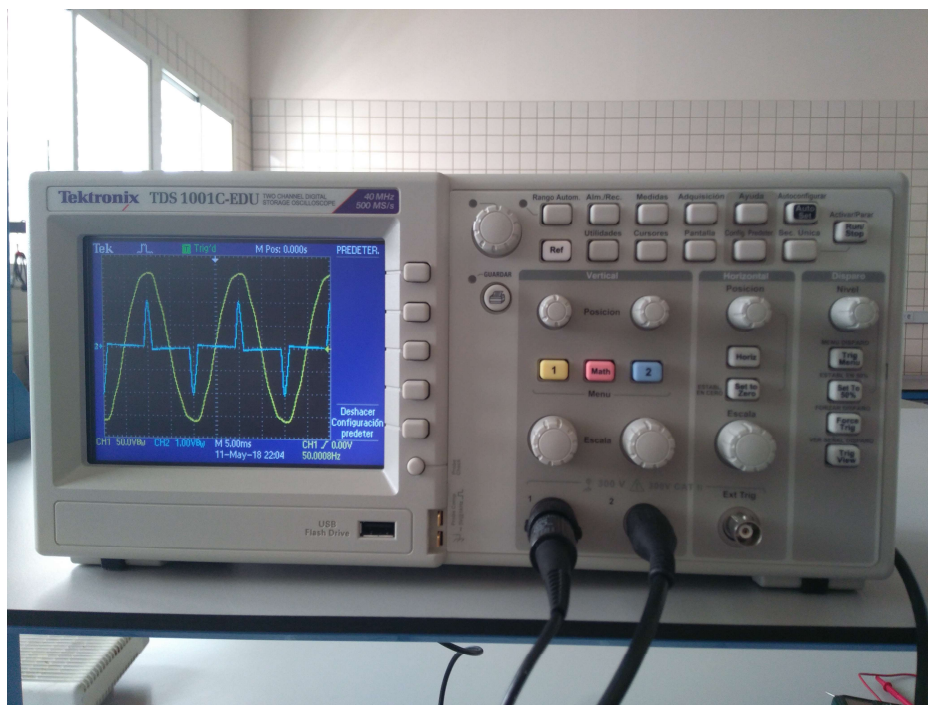


Figura 6-0. Osciloscopio.

Cuenta con pantalla digital que nos permite visualizar las formas de onda y dos canales para sendas sondas, por lo que con un modelo podemos obtener las dos magnitudes necesarias. Además, admite hasta un máximo de 300 V RMS por lo que no existe riesgo de superarlos con el voltaje que manejaremos, el de la red de baja tensión española que es de 230 V RMS nominales, que aunque puede ser superior siempre quedará muy por debajo de 300 V RMS. La configuración se realizará mediante el ordenador portátil conectado mediante el conector USB al osciloscopio, pero el aparato dispone de botones y mandos para hacerlo manualmente de manera sencilla.



## 6.1 Osciloscopio en LabVIEW

National Instruments ofrece drivers para algunos de los equipos más comunes en los laboratorios, nuestro osciloscopio Tektronix es uno de ellos por lo que se pueden descargar de la página web. La instalación de estos drivers permite cambiar el incómodo envío de comandos por una serie de IV's de LabVIEW que interconectados correctamente nos permiten acceder a todas las funciones que ofrece el osciloscopio.

A continuación están descritos los bloques empleados junto con la imagen correspondiente:

### Bloque de inicialización:

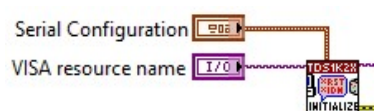


Figura 6-1. Bloque de inicialización.

Sirve para configurar el osciloscopio, para ello se le introduce un vector, el llamado *serial configuration* que contiene la tasa de baudios o *baud rate*, la cual indica el número de señales por segundo; el modo de control de flujo de datos, que usaremos como predeterminado el modo *RTS/CTS Request to Send/Clear to Send* y el modo de comprobación de la paridad, que dejaremos desactivado. También se le introduce el puerto USB al que está conectado en el portátil a través de *VISA resource name*.

### Bloque autoseup:



Activa el modo de adquisición automática.

Figura 6-2. Bloque autoseup

### Bloque de configuración de adquisición automática:

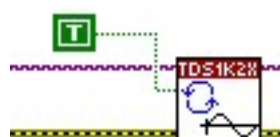


Figura 6-3. Bloque de configuración de adquisición automática.

Para terminar de activar esta configuración se coloca en cascada con el bloque anterior y se le envía un booleano positivo.

### Bloque de recuperación de la forma de onda:

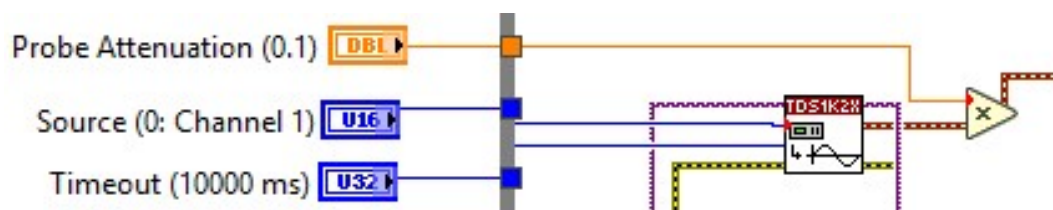


Figura 6-4. Bloque de recuperación de la forma de onda.

Con este bloque se genera la forma de onda con la que trabajaremos, para ello hay que enviarle el canal del que queremos obtener la forma de onda a través de *source* (recordemos que nuestro osciloscopio dispone de dos canales y usaremos ambos); y el tiempo en el que debe ocurrir para asegurar que se ha terminado de configurar el osciloscopio, en este caso 10000 ms. Además debemos multiplicar la señal de onda obtenida por un factor que depende de la sonda, en nuestro caso 0,1.

#### Bloque de error:

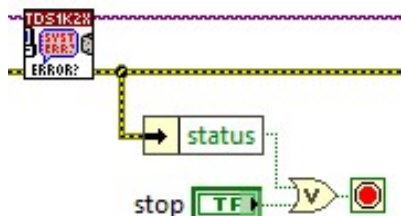


Figura 6-5. Bloque de error.

Este elemento se ocupa de detener el proceso en caso de detectar un error. En la imagen se observa que podemos detener el proceso pulsando un botón de stop en el panel frontal de LabVIEW, este es un booleano que entra a una puerta OR junto a la señal de error del bloque.

#### Bloque close:



Figura 6-6. Bloque close.

Cierra el bucle y con el bloque de mensaje de error nos permite conocer mejor los fallos que han surgido.

Las variables para la configuración ya mencionadas se introducen a través del panel frontal con la interfaz de la figura 6-7.

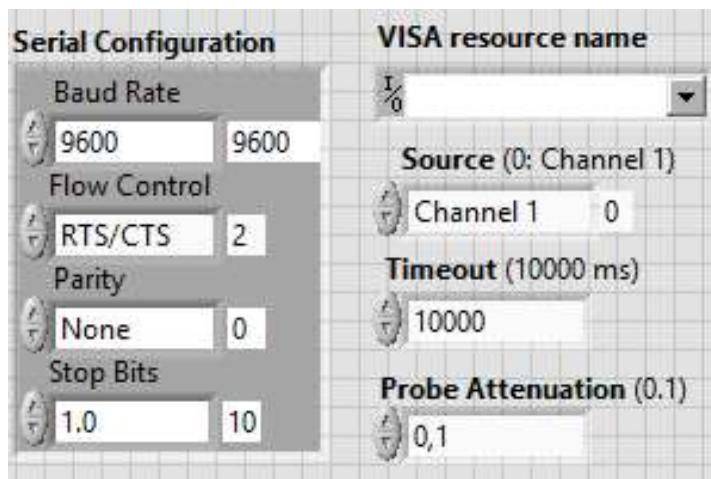


Figura 6-7. Panel frontal, área de configuración.

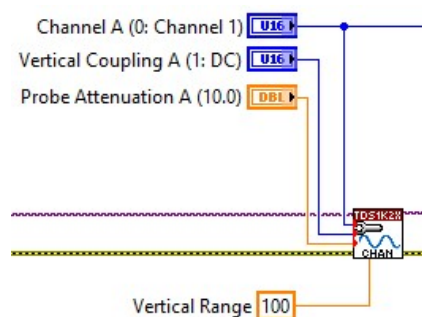
Bloque configure channel:

Figura 6-8. Bloque configure channel.

Este bloque permite una configuración manual de cada canal por separado, por lo que necesitaremos dos, uno para la sonda de tensión y otro para la de intensidad. Recibe como datos el canal a configurar, la atenuación de la sonda utilizada, el acoplamiento vertical y el escalado del eje Y.

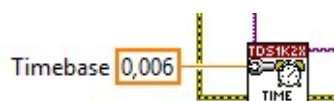
Bloque de tiempo:

Figura 6-9. Bloque de tiempo.

Configura el tiempo mostrado para ambos canales, el osciloscopio muestra las dos ondas acopladas, por lo que hay un único bloque. Para los experimentos emplearemos un tiempo de 0,05 segundos, por lo que se mostrarán dos ciclos y medio.

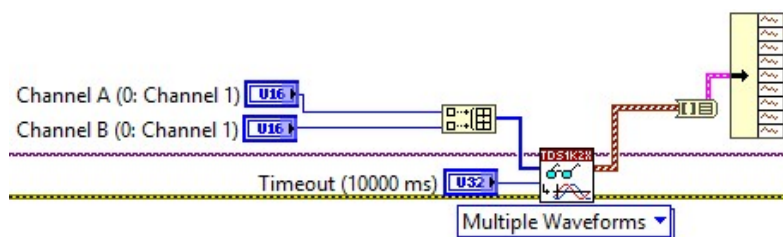
Bloque de adquisición de varias ondas:

Figura 6-10. Bloque de adquisición de varias ondas.

Este VI recibe como entradas los canales que queremos visualizar en forma de vector y tiene como salida un vector de las ondas. Este vector debe ser convertido en un *cluster* o grupo para ser desagrupado después con la función *unbundle*.

Estos tres últimos bloques son los que se usan para la adquisición discreta de un momento concreto de las ondas, y no serán combinados con los bloques autosestablish y de adquisición automática.

## 6.2 Caracterización metrológica del osciloscopio.

Para caracterizar metrológicamente el osciloscopio se ha empleado el generador de onda TG1010A, con un rango de frecuencia de 0.1 mHz a 10 MHz de distintas formas, incluyendo señales senoidales de tensión pico-pico desde 2.5 mV hasta 20 V (amplitud máxima de 10 V). Del manual del osciloscopio se extrae que el error máximo es de  $\pm 5\%$  para el nivel de tensión esperado, el cual se ha calculado que será de 16,25 V de pico a pico como se describe en el capítulo 7, dedicado al montaje del circuito.

En las especificaciones técnicas del manual del generador se indica que la precisión del equipo está garantizada a 1 parte por millón el primer año para la onda senoidal, que en tanto por ciento es 0,001%, un valor despreciable aunque fuera algo superior por tener más de un año en comparación con las especificaciones del osciloscopio.

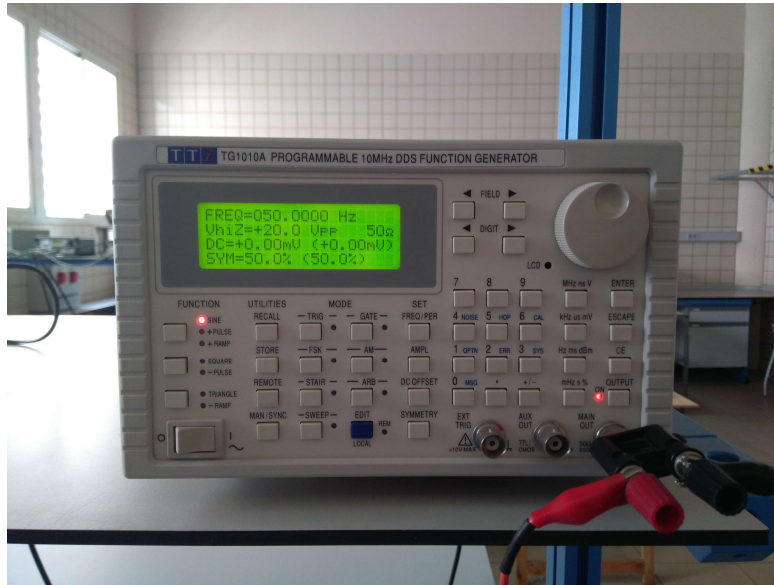


Figura 6-11. Generador TG1010A

La figura 6-11 es una foto del equipo utilizado en el laboratorio, configurado en este caso en concreto para una onda senoidal de frecuencia 50 Hz, tensión pico a pico de 20 V (el máximo), componente de continua 0 V y simétrica. El generador se ha conectado por la salida a través de un cable con doble cocodrilo en su extremo a la sonda del osciloscopio.

Se ha desarrollado un programa en LabVIEW configura el osciloscopio y a partir de la señal muestreada obtiene la frecuencia y la amplitud de la tensión, así podemos comparar la magnitud obtenida con la configurada en nuestro generador de onda.

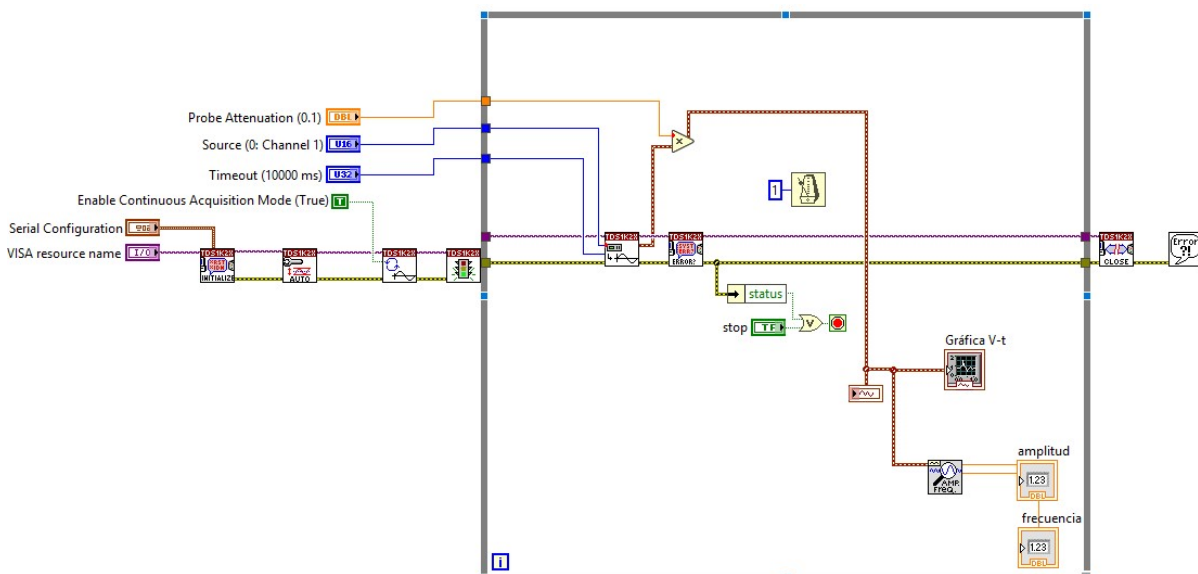


Figura 6-12. Instrumento Virtual de adquisición de onda de tensión.

Se ha tomado muestras a las frecuencias de 50Hz, 100Hz, 150Hz y 1500Hz; las que serían

frecuencia fundamental y frecuencias de armónicos  $n=2$ ,  $n=3$  y  $n=30$ . Las tensiones muestreadas han sido de amplitudes 2.5, 5, 7,5 y 10 V. Las frecuencias obtenidas en LabVIEW han sido idénticas a las introducidas, pero las tensiones son ligeramente diferentes como se muestra en la tabla 6-1:

Tabla 6-1. Tensiones en generador de ondas y LabVIEW.

<b>50Hz</b>		
Amplitud en LabVIEW	Amplitud del generador de ondas	Error en %
2,56	2,5	2,4
5,07	5	1,4
7,58	7,5	1,06666667
10,06	10	0,6
<b>100Hz</b>		
Amplitud en LabVIEW	Amplitud del generador de ondas	Error en %
2,56	2,5	2,4
5,08	5	1,6
7,57	7,5	0,93333333
10,05	10	0,5
<b>150Hz</b>		
Amplitud en LabVIEW	Amplitud del generador de ondas	Error en %
2,56	2,5	2,4
5,09	5	1,8
7,58	7,5	1,06666667
10,06	10	0,6
<b>250Hz</b>		
Amplitud en LabVIEW	Amplitud del generador de ondas	Error en %
2,56	2,5	2,4
5,1	5	2
7,64	7,5	1,86666667
10,15	10	1,5

<b>1500Hz</b>		
Amplitud en LabVIEW	Amplitud del generador de ondas	Error en %
2,56	2,5	2,4
5,08	5	1,6
7,64	7,5	1,86666667
10,15	10	1,5

Como podemos observar, el error máximo es del 2,4%, y no parece depender de la frecuencia a la que se realiza la lectura.

Debido a que el generador de ondas no alcanza una tensión lo suficientemente alta, se ha realizado otro ensayo a la tensión de la red, comparando los resultados obtenidos en el osciloscopio con el montaje final descrito en el capítulo 7 con los obtenidos en el multímetro digital Fluke 8845A, el cual tiene un error inferior al 0.01%.

A diferencia del experimento con el generador de ondas, en el que la señal era completamente estable, sin variar en absoluto de una lectura a otra para las mismas condiciones, en este caso la tensión de la red varía constantemente, por lo que se han tomado varias lecturas para estimar una medida con incertidumbre. Las lecturas son las de la tabla 6-2.

Tabla 6-2. Tensiones en multímetro y LabVIEW.

Lecturas en LabVIEW ( $V_{RMS}$ )	Lecturas en el multímetro ( $V_{RMS}$ )
231,50	225,82
231,47	225,85
231,44	225,81
231,63	225,73
231,68	225,97
231,85	225,91
231,40	225,92
231,52	225,91
231,42	225,80
231,49	226,02

A partir de estas lecturas se han obtenido las medias, la desviación típica muestral y la incertidumbre típica debido exclusivamente a la diferencia entre las muestras, siendo las medidas finales con estas consideraciones:  $U_{\text{LabVIEW}}=231,54\pm0,08$  V y  $U_{\text{Multímetro}}=225,87\pm0,04$  V. Igual que en el caso anterior el osciloscopio ofrece unas lecturas siempre superiores a las del multímetro.

Tomando como exacta la tensión del multímetro, el error cometido utilizando la tensión mostrada en LabVIEW es del 2,51%, menor que el error especificado en el manual. Este error del manual es el que se empleará en el capítulo de resultados experimentales, por lo que trabajaremos siempre del lado de la seguridad.

## 7 MONTAJE EN EL LABORATORIO

Para llevar a cabo las pruebas al contador se ha desarrollado un circuito en el laboratorio sobre el que podremos medir las magnitudes necesarias. Éste se ha realizado teniendo en cuenta siempre las medidas preventivas de riesgo eléctrico y aguas abajo de un interruptor diferencial y un magnetotérmico para proteger frente a cualquier cortocircuito o sobrecarga. El esquema del circuito es el de la figura 7-1.

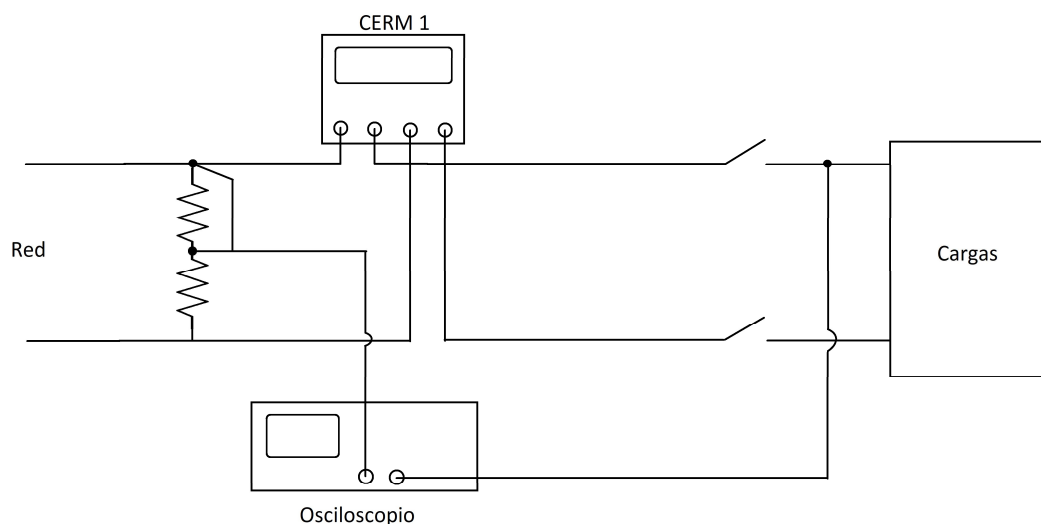


Figura 7-1. Esquema del montaje en laboratorio.

El circuito está conectado a una toma de corriente del laboratorio, aguas abajo hemos colocado el contador monofásico como hemos explicado en su capítulo correspondiente. A continuación se encuentra un interruptor doble que separa las cargas de la red y finalmente una base de enchufes en la que podremos conectar las cargas que se consideren oportunas.

### 7.1 Medida de tensión.

El osciloscopio no permite un escalado vertical superior a 5 Voltios por división y la tensión será de unos 650 V de pico a pico, por lo que no será posible visualizar la onda completa midiendo directamente. Debido a que el laboratorio no dispone de la sonda para mediciones de alto voltaje *Tektronix High Voltage Differential Probe* se ha optado por otra solución. Para ello se ha flotado la tierra del osciloscopio y se ha colocado un divisor de tensiones antes del contador. Se han empleado dos resistencias iguales y se ha medido la caída de tensión en una de ellas mediante una sonda de



tensión.

Como sonda de tensión se ha usado la *Textronix P2220 passive probe*, que tiene un selector para atenuar 10 veces la onda medida en la posición x10 o no atenuarla en la posición x1. En el extremo cuenta con un cocodrilo y un gancho que conectaremos a los puntos entre los que queramos medir tensión. El ancho de banda especificado en la ficha de datos es de 200 MHz, igual a la frecuencia que tendría un armónico de orden 4000000, por lo que cumple ampliamente nuestras necesidades.



Figura 7-2. Sonda de tensión.

Para el divisor de tensiones se han comparado varias resistencias de  $6800 \pm 5\% \Omega$  según el código de colores mediante el multímetro de precisión de la marca Fluke modelo 8845A. Según las especificaciones del manual la precisión en el rango medido (10 k $\Omega$ ), a una temperatura de 25° C y tomando el mayor error dependiente de la antigüedad del aparato es del 0,025%. Además de tener mayor precisión que los multímetros portátiles, la ventaja de emplear este es que tiene la función de medición con cuatro hilos. En este método se inyecta la corriente por dos hilos y se mide la caída de tensión con los otros dos, por lo que no fluye corriente por los hilos de medida al existir una resistencia muy elevada en el aparato, evitando así sumar a la resistencia del elemento que queremos analizar la resistencia de los cables empleados en la medición.



Figura 7-3. Multímetro de precisión Fluke 8845A midiendo R.

En el divisor de tensiones de la figura 7-1 la tensión medida en el osciloscopio será:

$$v_{osc} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times v_{red}$$

por lo que si queremos dividir la tensión por dos debemos intentar que las resistencias sean lo más parecidas posibles. Las resistencias medidas han resultado ser:

$$R_a = 6,6605 \text{ k}\Omega$$

$$R_b = 6,6660 \text{ k}\Omega$$

$$R_c = 6,6587 \text{ k}\Omega$$

Después se ha calculado el factor que quedaría multiplicando a la tensión de red combinando las resistencias y el error cometido aproximando este factor a 0,5. Los resultados se han reflejado en la tabla 7-1.

Resistencias utilizadas	$\frac{R_1}{R_1 + R_2}$	Error en %
$R_a$ y $R_b$	0,4997936442	0,041
$R_a$ y $R_c$	0,5000675716	0,013
$R_b$ y $R_c$	0,5002739274	0,055

Tabla 7-1. Error en porcentaje con cada par de resistencias.

Las resistencias más parecidas y las colocadas en el circuito son  $R_a$  y  $R_c$ , y el error cometido si suponemos que son idénticas es del 0,013%, despreciables comparado con el 5% del error del osciloscopio.

Con este divisor de tensiones y la atenuación de la sonda la tensión de pico a pico queda reducida 20 veces, siendo ahora de 16,25 V, abarcable por el osciloscopio.

## 7.2 Medida de intensidad.

Para obtener la forma de onda de la intensidad se ha utilizado una sonda de corriente alterna para osciloscopio en forma de pinza amperimétrica de la marca Fluke modelo i1000s. Para medir se coloca la sonda alrededor del conductor que queremos analizar y se conecta al osciloscopio directamente mediante un conector BNC. Se valoró también emplear un transductor de intensidad, pero el método utilizado asegura el aislamiento entre el circuito y la sonda de intensidad.



Figura 7-4. Sonda de intensidad.

Permite medir corrientes desde 5 Hz hasta 100 kHz y desde 100 mA hasta 1000 A eficaces, colocando el selector en la posición adecuada según el rango de intensidades que esperamos medir: 10 A, 100 A o 1000 A.

## 8 INCERTIDUMBRE DE LAS MEDIDAS EXPERIMENTALES

En las medidas tomadas en el laboratorio influyen algunos factores que nos obligarán a tratar los datos obtenidos para expresar el resultado de las mediciones como un valor medido y su incertidumbre compuesta. La forma de exponer estos datos viene regulada por el CEM (Centro Español de Metrología) en la “Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida”.

Para el valor medido se puede tomar una única medida o varias, en cuyo caso el valor medido es la media aritmética de todas ellas, lo cual favorece la obtención de resultados fiables y además permite conocer con más exactitud la incertidumbre del problema al que nos enfrentamos. La media se calcula de la siguiente manera:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

donde  $\bar{x}$  es la media,  $n$  el número de muestras y  $x_i$  la lectura  $i$  de la magnitud  $x$ .

La desviación típica ( $s$ ) expresa la dispersión de las lecturas, y ofrece una idea de la precisión de los datos que estamos tomando. Una alta desviación puede deberse al instrumento de medida o a la variación de la magnitud estudiada. Para hallarla se utiliza la siguiente expresión:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

La incertidumbre típica ( $u_1$ ) se obtiene dividiendo la desviación típica entre la raíz cuadrada del número de muestras suponiendo una distribución estadística normal para la aleatoriedad de las medidas, lo cual parece aproximarse a la realidad en el caso de la incertidumbre debido a la imprecisión del instrumento.

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Debido a la resolución del aparato de medida existe otra incertidumbre típica ( $u_2$ ) igual a la mitad de la última cifra que ofrece el instrumento, ya que se supone que muestra el valor más cercano al real. En este caso se supone una distribución rectangular para la aleatoriedad, por lo que la expresión de esta incertidumbre típica es:

$$u_2 = \frac{\text{Incertidumbre debida a la resolución}}{\sqrt{3}}$$

La imprecisión especificada en la hoja de especificaciones del instrumento, como por ejemplo un osciloscopio, introduce una incertidumbre típica adicional  $u_3$ .

Con todas estas incertidumbres típicas se halla la incertidumbre típica combinada ( $u_c$ ), la cual se calcula de la siguiente manera:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

Finalmente, para obtener la incertidumbre expandida ( $U$ ), que es la que quedará reflejada en los resultados finales, debemos multiplicar la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura  $k$ .

$$U = k \cdot u_c$$

Este factor es el valor de  $t$  de Student para el nivel de confianza deseado, normalmente del 95%, y los grados de libertad efectivos  $v_{ef}$  resultantes de la siguiente expresión:

$$v_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum_i \frac{u_i^4}{v_i}}$$

Donde  $v_i$  es el número de grados de libertad para el valor de incertidumbre típica  $i$ , el número de muestras menos 1 para  $u_1$  e infinito para  $u_2$  y  $u_3$ .

## 8.1 Incertidumbre en este experimento.

Para este experimento en concreto podemos diferenciar dos instrumentos diferentes: el osciloscopio y el contador CERM1; cada uno con tres medidas: tensión, intensidad y potencia. Cada medida tendrá unas incertidumbres típicas diferentes, a partir de las cuales calcularemos la incertidumbre expandida.

La incertidumbre  $u_1$  debido a la desviación de las diferentes lecturas se calcula de la misma forma para ambos instrumentos, ya que se ha tomado el mismo número de lecturas.

La incertidumbre  $u_2$ , sin embargo, sí cambia al tener diferente resolución un instrumento que otro. El osciloscopio muestra 6,5 bits, por lo que será insignificante comparada con  $u_3$ , mientras que el contador muestra las décimas de voltio, las décimas de amperio y las decenas de watio; en este caso la incertidumbre típica sí que será notable.

La incertidumbre  $u_3$  en el caso del osciloscopio es del  $0,05/\sqrt{n}$  del valor medido para tensión e intensidad, mientras que se ha tomado  $\sqrt{\frac{0,05^2 + 0,05^2}{n}}$  para la potencia, al ser múltiplo de ambos; se ha tomado una distribución normal de la desviación. En el caso del contador se ha tomado nula debido a la falta de datos.

Para agilizar el cálculo en todos los experimentos se ha desarrollado una hoja de cálculo en Microsoft Excel que automatiza la obtención de resultados a partir de las lecturas. En la figura 8-1 se puede ver una captura de esta hoja de cálculo para el experimento con una torre de ordenador.

	B	C	D	E	F	G	H
1		Medidas en LabVIEW			Medidas en el contador		
2		Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
3							
4		231,4	0,57	67	228,1	0,5	60
5		231,87	0,57	67	227,9	0,5	60
6		232,15	0,57	67	228	0,5	70
7		232,72	0,58	67	228,5	0,5	70
8		232,25	0,58	67	226,9	0,5	60
9							
10	Media	232,078	0,574	67	227,88	0,5	64
11	Desviación típica muestral (s)	0,487308937	0,00547723	0	0,59329588	0	5,47722558
12	Incertidumbre típica ( $u_1$ )	0,217931182	0,00244949	0	0,26532998	0	2,44948974
13							
14	Incertidumbre debido a la resolución	0	0	0	0,05	0,05	5
15	Incertidumbre típica ( $u_2$ )	0	0	0	0,02886751	0,02886751	2,88675135
16							
17	Incertidumbre debido a la imprecisión del osciloscopio	11,6039	0,0287	4,73761543	0	0	0
18	Incertidumbre típica ( $u_3$ )	5,189421841	0,01283503	2,11872603	0	0	0
19							
20	Incertidumbre combinada ( $u_c$ )	5,193995865	0,01306668	2,11872603	0,26689573	0,02886751	3,7859389
21	Factor de cobertura (k)	1,959965823	1,96069666	1,95996636	2,77644511	1,95996636	2,07387307
22	Incertidumbre expandida (U)	10,18005438	0,02561979	4,15263174	0,74102136	0,05657936	7,85155672
23							
24	Grados de libertad efectivos	1290591,777	3239,05163	1000000	4,09525744	1000000	22,8271605
25	t de Student	1,959966	1,960697	1,959966	2,776445	1,959966	2,073873

Figura 8-1. Hoja de cálculo para la obtención de incertidumbres.

En la parte superior, dentro de la tabla se introducen los datos de las lecturas tanto en LabVIEW como en el contador. Se han tomado cinco lecturas en cada caso.

A continuación, se ha calculado la media de todas estas lecturas, la desviación típica debido a las muestras y la primera incertidumbre típica ( $u_1$ ). Después la incertidumbre debido a la resolución y su incertidumbre típica, que se ha tomado nula en el osciloscopio debido a que no se apreciaban cambios en la incertidumbre expandida al introducir los valores reales, muy próximos a cero.

Después se halla la incertidumbre debido a la imprecisión detallada en el manual, y la combinada de  $u_1$ ,  $u_2$  y  $u_3$ .

Para el factor de cobertura se ha usado la t de Student con un nivel de confianza del 95%, esta función está incluida en Excel escribiendo “=DISTR.T.INV(1-confianza; grados de libertad)”.

Finalmente se ha multiplicado el factor de cobertura por la incertidumbre combinada para obtener la incertidumbre expandida.

Los datos necesarios para exponer la medida final son la media y la incertidumbre expandida, resaltada en rojo y azul respectivamente en la hoja de cálculo. Se toman dos cifras significativas de la U, y se redondea la media al mismo número de dígitos decimales. De esta manera el caso del ordenador quedaría como se ha recogido en la tabla 8-1.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
LabVIEW	232±10	0,574±0,026	67,0±4,2
Contador	227,88±0,74	0,500±0,057	64,0±7,9

Tabla 8-1. Ejemplo de presentación de medidas.

## 9 EXPERIMENTO A

Se han conectado varias cargas disponibles en el laboratorio de diferentes potencias, unas lineales y otras no lineales, y se han comparado las magnitudes que muestra el contador CERM1 y las tratadas con LabVIEW a partir de las obtenidas en el osciloscopio. Las lecturas se han tomado en momentos aleatorios. Las lecturas de tensión, intensidad y potencia en LabVIEW de cada fila son en un mismo instante, mientras que las del contador no, debido a que no las muestra de forma simultánea. En cada caso se ha capturado las formas de onda de tensión e intensidad, además del espectro armónico en LabVIEW, y se han ampliado las que se ha considerado oportuno. Los resultados se muestran a continuación:

### 9.1 Calefactor

Se ha conectado el calefactor de la imagen al circuito. El calefactor es de 2000 W de potencia nominal, y consta de tres posiciones de funcionamiento: en la primera solo funciona el ventilador, el cual es una carga insignificante para la red, por lo que esta posición se ha descartado para el experimento; en la segunda además del ventilador funciona una resistencia que constituye aproximadamente la mitad de la carga máxima del calefactor; y en la tercera posición se añade una segunda resistencia de valor parecida a la anterior, de forma que la carga total se acerca a la nominal de 2000 W.



Figura 9-0. Calefactor empleado.



### 9.1.1 Posición A

Se ha colocado en la primera posición, la correspondiente a una única resistencia. Las gráficas obtenidas son las de las figuras 9-1 y 9-2.

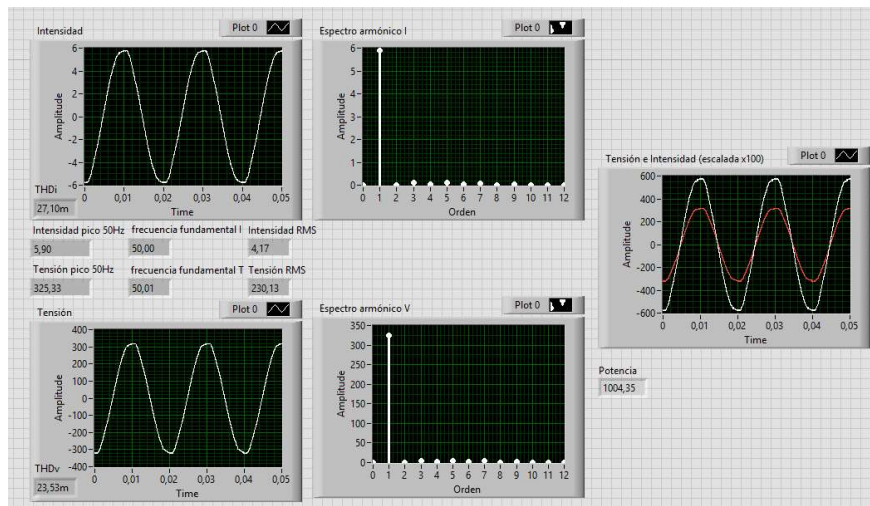


Figura 9-1. Panel frontal experimento A, calefactor 1000W.

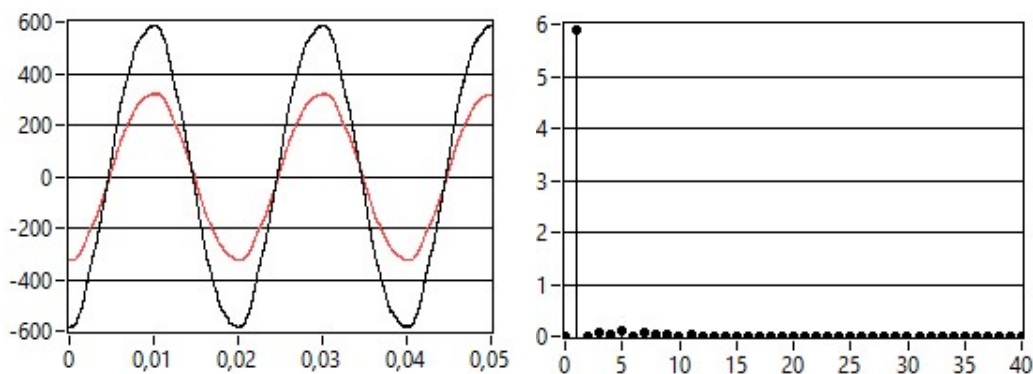


Figura 9-2. Tensión e Intensidad(x100) frente a tiempo y espectro armónico de intensidad en experimento A, calefactor 1000W.

Al tratarse de resistencias, es una carga muy lineal, con un THDi del 2,71% y un THDv del 2,35%. Las componentes distintas a la fundamental son insignificantes. Las lecturas son las de la tabla 9-1.

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
229,15	4,22	1012	224,3	4,1	920
228,36	4,21	1007	224,5	4,1	920
227,90	4,22	1003	224,2	4,1	920
227,26	4,21	1003	224,3	4,1	920
228,02	4,21	1005	224,4	4,1	920

Tabla 9-1. Lecturas en experimento A, calefactor 1000W.

En las lecturas se aprecia que la tensión fluctúa algo en ambos instrumentos, lo cual es normal al tratarse de la red eléctrica. En todos los casos las lecturas de LabVIEW son superiores, pero en cada instrumento se desvían muy poco. Una vez aplicado el cálculo de la incertidumbre a las lecturas explicado en el capítulo anterior llegamos a las medidas de la tabla 9-2.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	228±10	4,21±0,18	1006±62
Medida en contador	224,34±0,14	4,100±0,057	920,0±5,7

Tabla 9-2. Medidas en experimento A, calefactor 1000W.

La potencia en LabVIEW es superior, a pesar de la incertidumbre podemos afirmar en base al experimento que el contador muestra una potencia inferior a la que debería, aunque estaría dentro de los límites legales.

### 9.1.2 Posición B

Ahora se ha colocado el selector en la posición de máxima potencia, por lo que funcionarán ambas resistencias. Las gráficas obtenidas son las de las figuras 9-3 y 9-4.

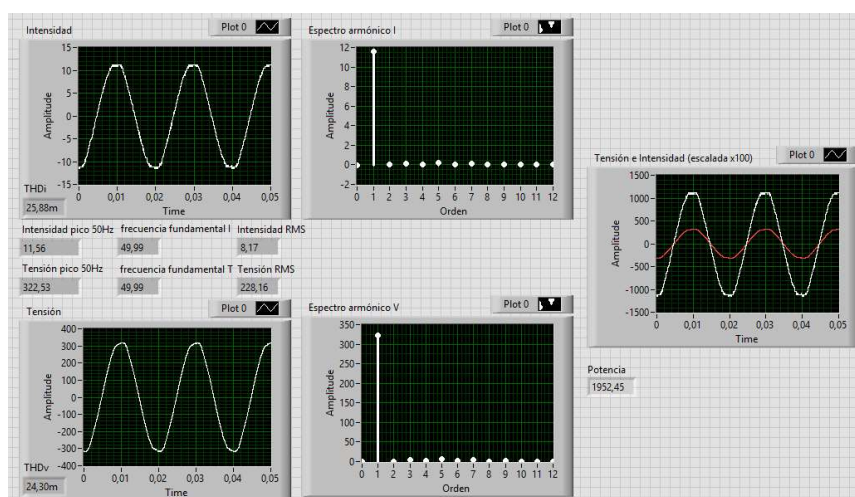


Figura 9-3. Panel frontal experimento A, calefactor 2000W.

Sigue siendo una carga muy lineal, con un THDi del 2,59% y un THDv del 2,43%, la intensidad y la potencia son superiores al caso anterior como es lógico debido a que la carga es mayor. Las lecturas son las de la tabla 9-3.

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
227,11	8,12	1930	223,6	7,9	1770
227,60	8,14	1942	223,4	7,9	1770
227,13	8,13	1933	223,4	7,9	1760
226,82	8,11	1925	223,4	7,9	1770
226,89	8,12	1929	223,5	7,9	1760

Tabla 9-3. Lecturas en experimento A, calefactor 2000W.

Las lecturas en LabVIEW son superiores en las tres magnitudes estudiadas, las medidas resultantes son las de la tabla 9-4.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	227±10	8,12±0,36	1930±120
Medida en contador	223,46±0,11	7,900±0,057	1776,0±7,9

Tabla 9-4. Medidas en experimento A, calefactor 2000W.

Igual que en el caso anterior, la potencia mostrada por el contador es inferior a la debida, aunque estaría dentro de los límites legales.

## 9.2 Resistencias en serie

Se han conectado las dos resistencias de la foto en serie al montaje. El conjunto se ha medido en el multímetro obteniéndose una resistencia de unos 122 ohmios. Se trata de una carga lineal por lo que se espera obtener unas ondas cercanas a senoides perfectas.



Figura 9-4. Resistencias de 122 ohmios.

Las formas de onda obtenidas son las de la figura 9-4.

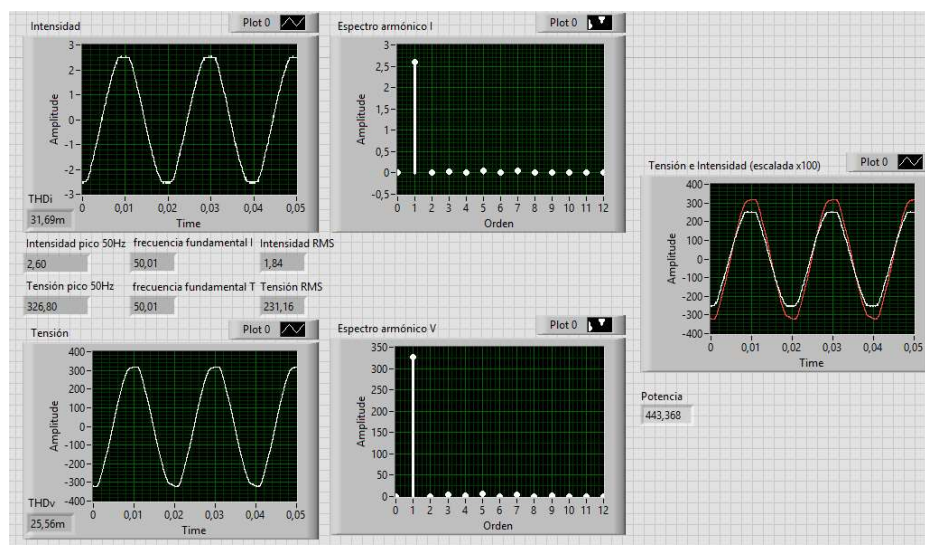


Figura 9-5. Panel frontal experimento A, resistencias en serie.

Como esperábamos las ondas se parecen a senoidales puras, siendo el THDi del 3,17% y el THDv del 2,56%. Las lecturas de ambos instrumentos son las de la tabla 9-5

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
229,18	1,81	434	225,1	1,8	400
229,12	1,81	431	225,3	1,8	400
228,94	1,81	431	224,9	1,8	400
229,11	1,81	431	225,0	1,8	400
229,36	1,81	432	225,1	1,8	400

Tabla 9-5. Lecturas en experimento A, resistencias en serie.

Las intensidades son similares, pero las tensiones y potencias son superiores en las lecturas de LabVIEW. Las medidas finalmente son las de la tabla 9-6.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	229±10	1,810±0,079	432±27
Medida en contador	225,08±0,19	1,800±0,057	400,0±5,7

Tabla 9-6. Medidas en experimento A, resistencias en serie.

Si hallamos la potencia que debemos obtener a partir de la medida de tensión y la resistencia medida en el polímetro, en el caso de LabVIEW la potencia medida debería ser  $P=V^2/R=229^2/122=430$ , aproximadamente la medida obtenida. Sin embargo, en el caso del contador,  $P=225^2/122=415$ , notablemente diferente a la potencia medida en el contador.

### 9.3 Resistencias en serie con rectificador de media onda

Se han conectado las dos resistencias en serie del experimento anterior con un rectificador de media onda para tener así una primera carga no lineal. La intensidad resultante debe ser igual a una senoide en el semiciclo positivo y nula en el semiciclo que queda por debajo de 0.

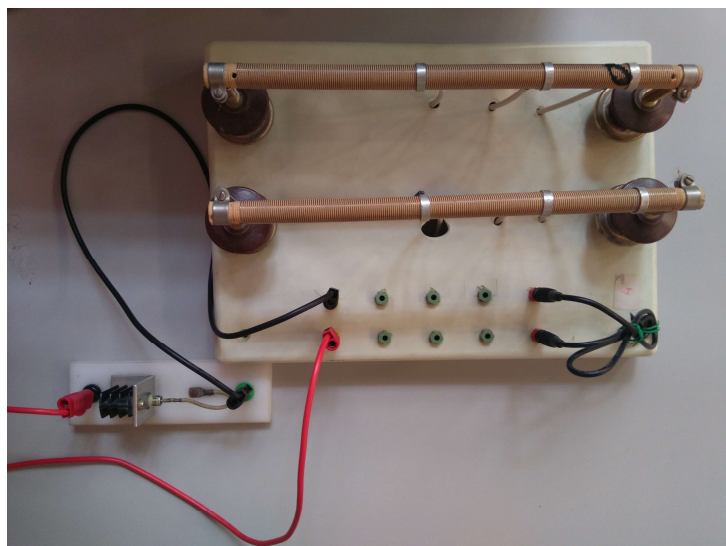


Figura 9-6. Resistencias con rectificador de media onda.

Después se ha alimentado desde la red y se han obtenido los datos en LabVIEW y en el contador. Las gráficas resultantes son las de las figuras 9-7 y 9-8

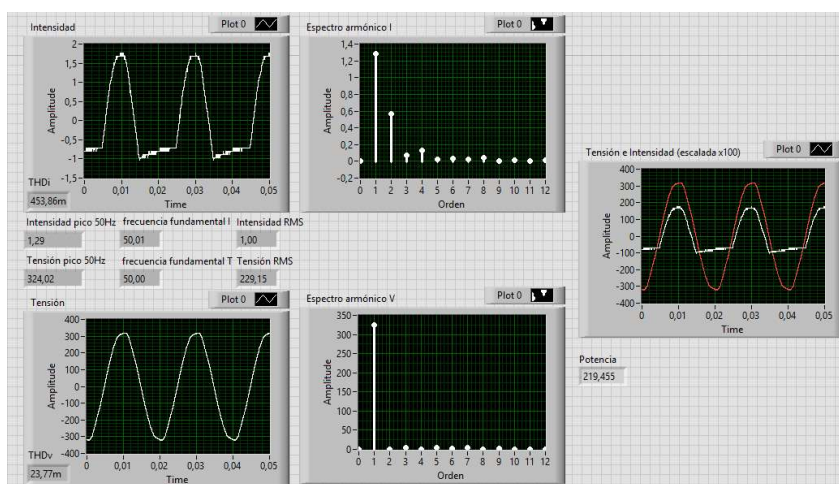


Figura 9-7. Panel frontal experimento A, resistencias con rectificador de media onda.

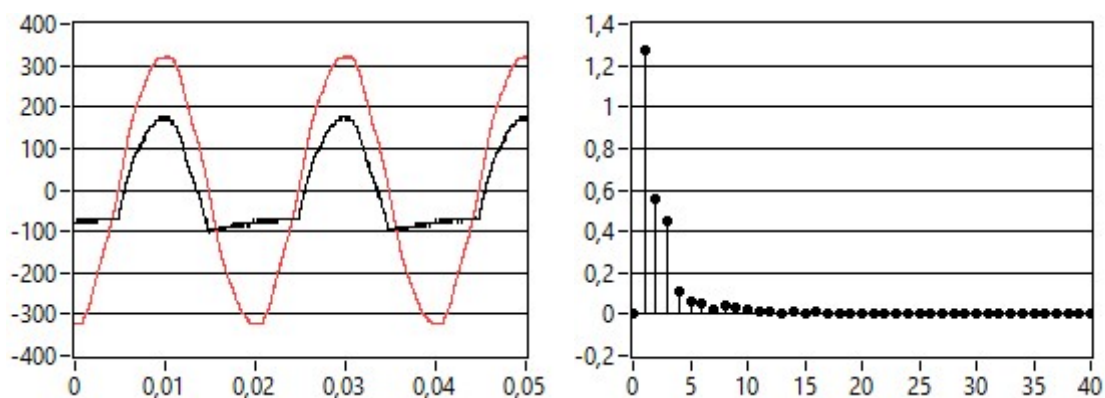


Figura 9-8. Tensión e Intensidad(x100) frente a tiempo y espectro armónico de intensidad en experimento A, resistencias con rectificador de media onda.

Es de especial interés la onda de intensidad, la cual difiere bastante de la esperada, ya que una parte importante del semiciclo negativo sigue presente (hasta valores inferiores a -0,5 A), y además la parte inferior de la onda no es recta, presentando una ligera pendiente. Aquí se pone de manifiesto la diferencia entre los modelos perfectos y los reales.

Los armónicos en tensión son insignificantes como es habitual, siendo la distorsión armónica del 2,37%; mientras que la THDi es del 45%, destaca el armónico de orden 2 debido a la naturaleza del rectificador de media onda.

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
229,15	1	219	226	0,9	200
229,94	0,99	217	226,2	0,9	200
230,24	0,99	218	226,5	0,9	200
230,26	0,99	217	226,1	0,9	200
230,26	0,99	218	226,3	0,9	200

Tabla 9-7. Lecturas en experimento A, resistencias en serie con rectificador de media onda.

Las lecturas de tensión van variando como es normal, aunque son similares. Destaca que la potencia en general parece superior en las lecturas de LabVIEW que en las del contador.

Una vez aplicado el cálculo de la incertidumbre a las lecturas llegamos a las medidas de la tabla 9-8

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	230±10	0,992±0,044	218±14
Medida en contador	226,22±0,25	0,900±0,057	200,0±5,6

Tabla 9-8. Medidas en experimento A, resistencias en serie con rectificador de media onda.

Las medidas de LabVIEW son superiores en todos los casos, aunque los rangos coinciden en los tres casos. Aunque la potencia medida en LabVIEW es 18 W superior, debido a la incertidumbre no podemos asegurar que exista un error en el contador. Como era de esperar, la potencia con el rectificador de media onda es la mitad que sin él para las mismas resistencias

## 9.4 Torre de ordenador

Se ha enchufado una torre de ordenador de sobremesa en el extremo del circuito y se ha esperado un tiempo para que arranque después de encenderlo, con el fin de evitar que el software interfiera en la toma de las medidas y que éstas se realicen siempre en el régimen permanente. Las gráficas en



LabVIEW son las de las figuras 9-9 y 9-10.

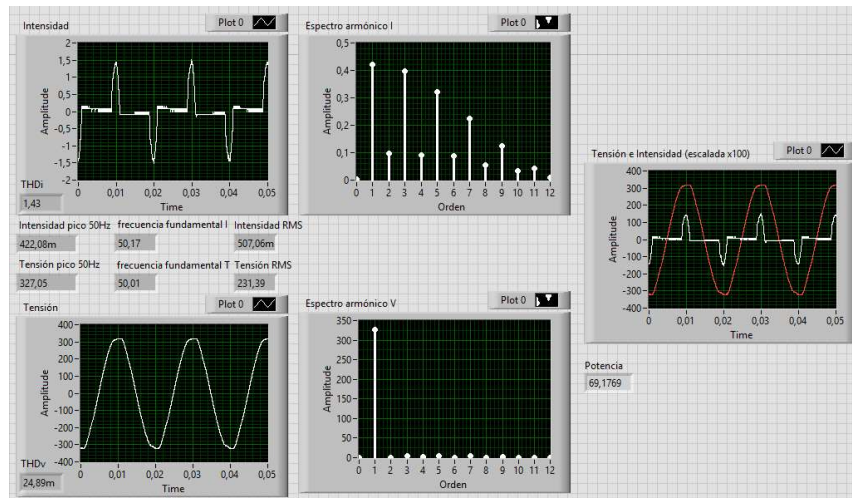


Figura 9-9. Panel frontal experimento A, torre de ordenador.

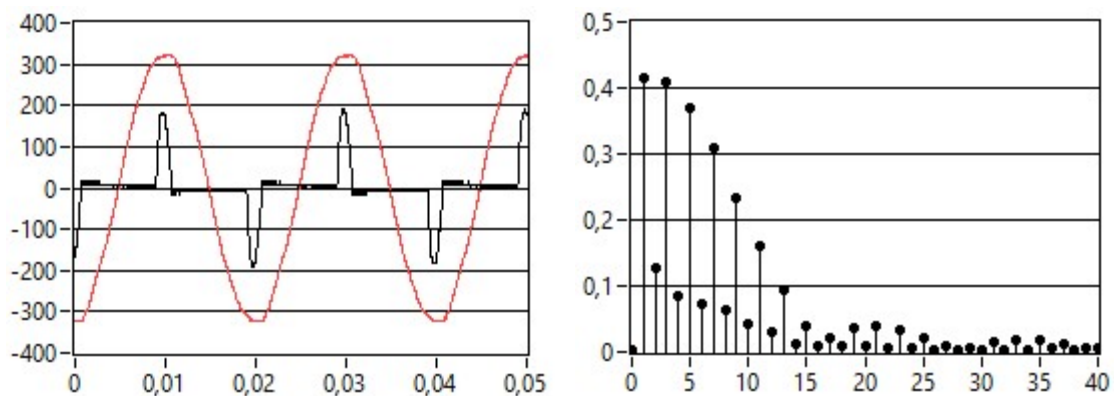


Figura 9-10. Tensión e Intensidad(x100) frente a tiempo y espectro armónico de intensidad en experimento A, torre de ordenador.

Como se puede apreciar, los armónicos en tensión son insignificantes, siendo la distorsión armónica del 2,49%; mientras que la THDi es del 143%, con los armónicos impares notablemente superiores a los pares, y descendientes conforme aumenta el orden.



Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
231,4	0,57	67	228,1	0,5	60
231,87	0,57	67	227,9	0,5	60
232,15	0,57	67	228	0,5	70
232,72	0,58	67	228,5	0,5	70
232,25	0,58	67	226,9	0,5	60

Tabla 9-9. Lecturas en experimento A, torre de ordenador.

En las lecturas se aprecia que la tensión fluctúa algo en ambos instrumentos, lo cual es normal al tratarse de la red eléctrica, mientras que la intensidad y la potencia se mantienen uniformes excepto en el caso de la potencia leída en el contador, lo que puede deberse a que el contador no muestra la cifra de las unidades, y la medida se encontrará previsiblemente cerca de los 65 W.

Una vez aplicado el cálculo de la incertidumbre a las lecturas explicado en el capítulo anterior llegamos a las medidas de la tabla 9-10.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	$232 \pm 10$	$0,574 \pm 0,026$	$67,0 \pm 4,2$
Medida en contador	$227,88 \pm 0,74$	$0,500 \pm 0,057$	$64,0 \pm 7,9$

Tabla 9-10. Medidas en experimento A, torre de ordenador.

Las medidas de LabVIEW son superiores siempre, aunque los rangos coinciden en los tres casos. Cabe destacar sin embargo que en el caso de la potencia la incertidumbre es muy grande debido a la resolución del contador.

## 9.5 Torre de ordenador y resistencias con rectificador de media onda

Se han conectado a la vez la torre de ordenador y las resistencias en serie con un rectificador de media onda. Las gráficas obtenidas son las de las figuras 9-11 y 9-12.

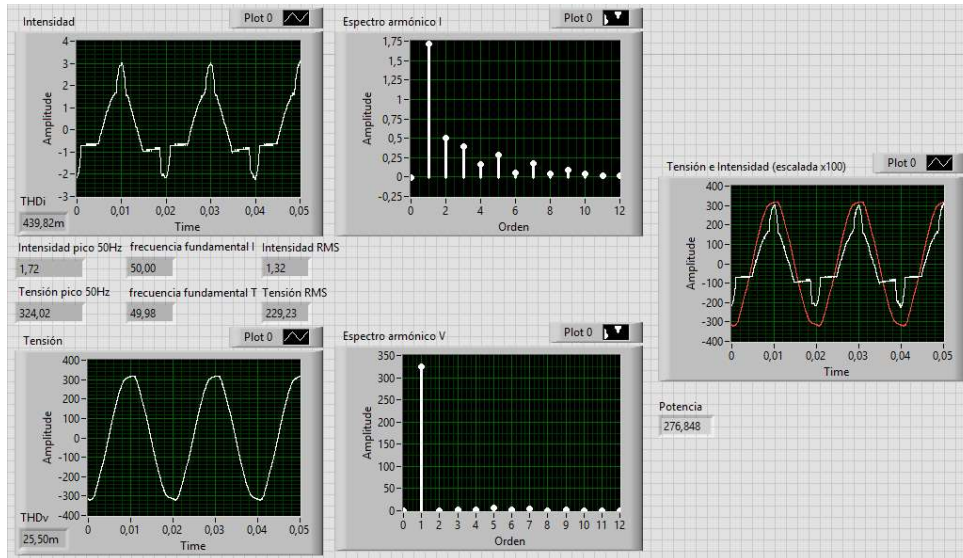


Figura 9-11. Panel frontal experimento A, torre de ordenador y resistencias con rectificador de media onda.

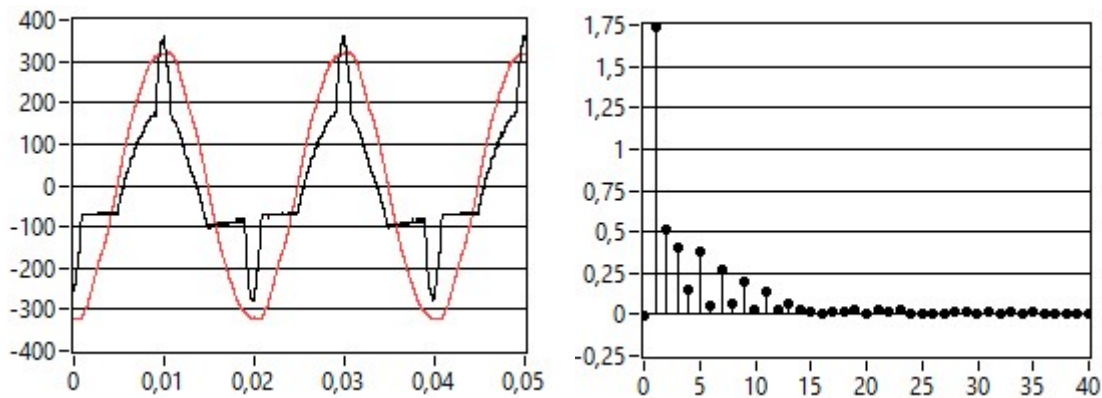


Figura 9-12. Tensión e Intensidad(x100) frente a tiempo y espectro armónico de intensidad en experimento A, torre de ordenador y resistencias con rectificador de media onda.

Como en casos anteriores, los armónicos en tensión son insignificantes, siendo la distorsión armónica del 2,55%; mientras que la THDi es del 43%, parece que la unión de las dos cargas ayuda a que la forma de onda de intensidad se parezca a la fundamental más que por separado.

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
231,28	1,34	282	226,4	1,3	270
230,1	1,34	280	225,1	1,3	270
229,8	1,33	279	225,8	1,3	260
229,2	1,32	277	225,2	1,3	270
229,4	1,33	278	225,4	1,3	270

Tabla 9-11. Lecturas en experimento A, torre de ordenador y resistencias con rectificador de media onda.

En este caso todas las lecturas van variando exceptuando la intensidad en el contador, aunque son parecidas unas a otras. Destaca que la potencia en general parece superior en las lecturas de LabVIEW que en las del contador.

Una vez aplicado el cálculo de la incertidumbre a las lecturas llegamos a las medidas de la tabla 9-12.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	230±10	1,332±0,059	279±17
Medida en contador	225,58±0,66	1,300±0,056	268,0±7,1

Tabla 9-12. Medidas en experimento A, torre de ordenador y resistencias con rectificador de media onda.

Las medidas de LabVIEW son superiores siempre, aunque los rangos coinciden en los tres casos. Aunque la potencia medida en LabVIEW es 11 W superior, debido a la incertidumbre no podemos asegurar que exista un error en el contador.

## 9.6 Torre de ordenador y portátil

Se han conectado a la vez la torre de ordenador y el portátil. Se ha esperado un tiempo prudencial para medir en el régimen permanente. Las gráficas obtenidas son las de las figura 9-13 y 9-14.

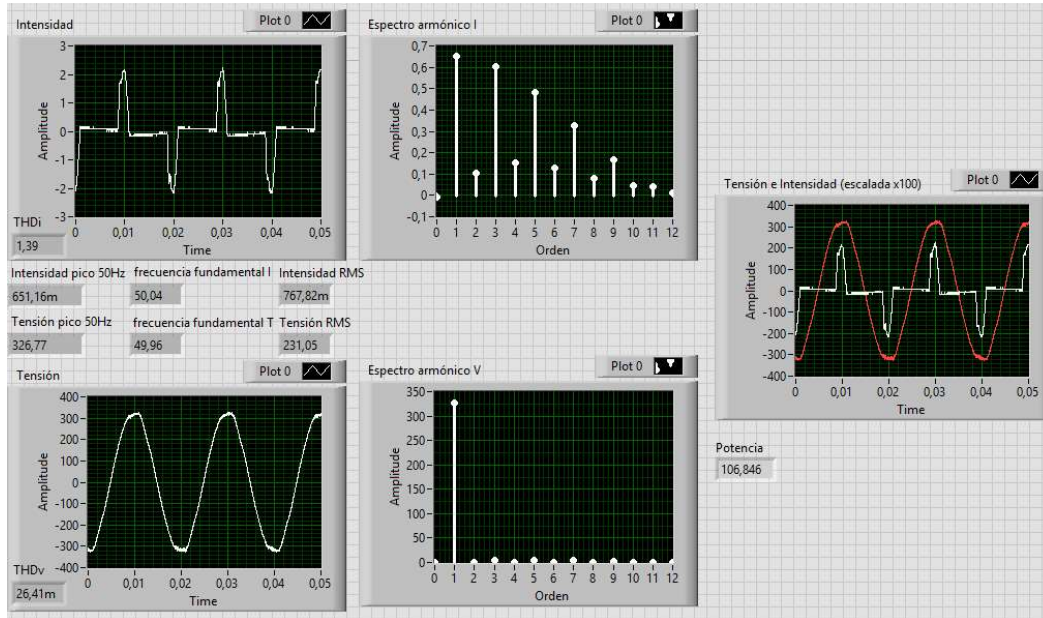


Figura 9-13. Panel frontal experimento A, torre de ordenador y portátil.

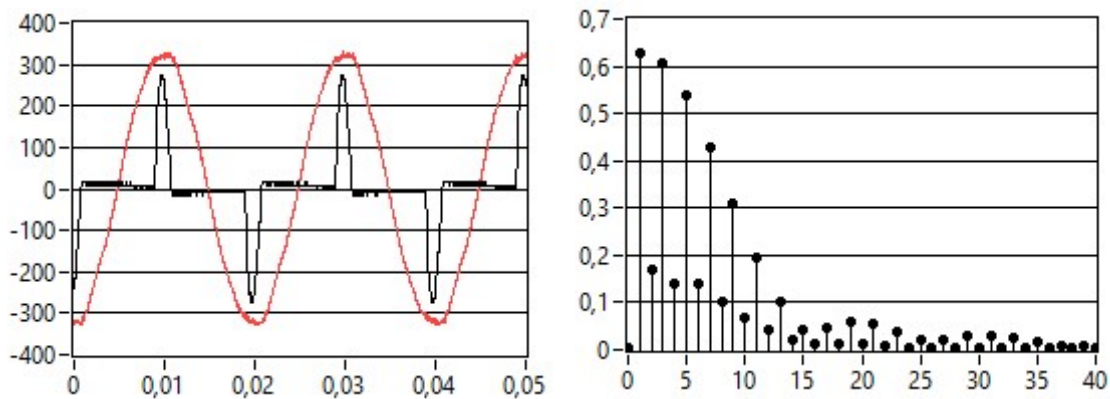


Figura 9-14. Tensión e Intensidad(x100) frente a tiempo y espectro armónico de intensidad en experimento A, torre de ordenador y portátil.

Los resultados obtenidos son muy similares a los obtenidos conectando solo la torre de ordenador, con un THDi del 139% frente al 143% del caso mencionado. Sin embargo la amplitud es algo superior en intensidad como cabe esperar. El THDv es del 2,61%, muy bajo como siempre.

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
229,55	0,77	105	226,4	0,7	100
230,31	0,78	107	226,3	0,7	90
231,26	0,76	105	227,2	0,7	100
231,05	0,77	107	227,3	0,7	100
229,83	0,80	108	227,0	0,7	90

Tabla 9-13. Lecturas en experimento A, torre de ordenador y portátil.

Las lecturas de LabVIEW son ligeramente superiores y tienen poca dispersión, aunque en el caso de la potencia parece que se alejan notablemente de las del contador. Calculamos la incertidumbre de las medidas.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	230±10	0,776±0,037	106,4±6,7
Medida en contador	226,84±0,58	0,700±0,057	96,0±7,9

Tabla 9-14. Medidas en experimento A, torre de ordenador y portátil.

La media de la potencia en LabVIEW es más de 10 W superior; sin embargo, la incertidumbre de la medida no nos permite asegurar que exista un error.

## 9.7 Torre de ordenador, portátil y calefactor.

En este caso se ha conectado además de las dos cargas del caso anterior el calefactor. Se ha seleccionado la posición de menor potencia para que los armónicos que causan las cargas no lineales queden menos eclipsados por la potencia de la carga lineal. Las gráficas obtenidas son las de las figuras 9-15 y 9-16.

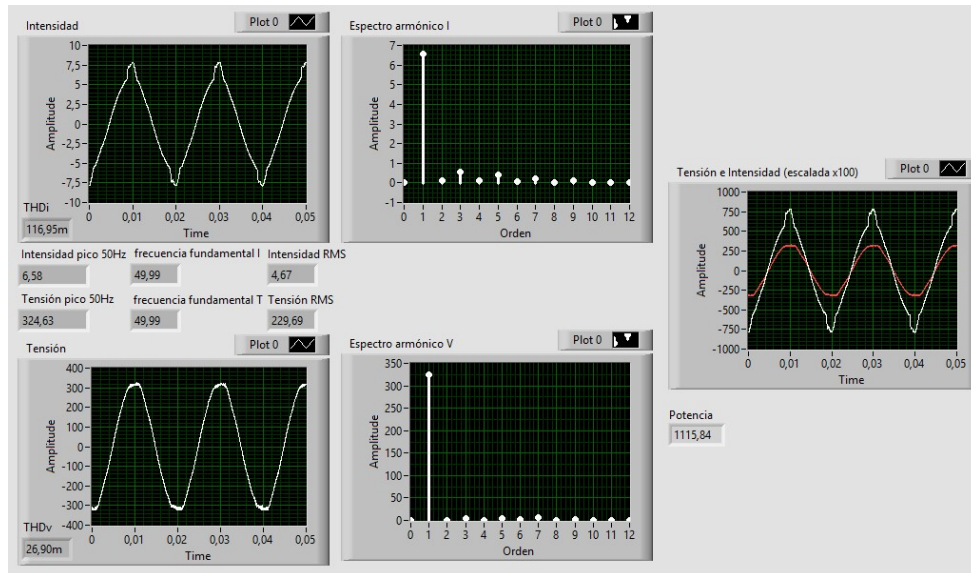


Figura 9-15. Panel frontal experimento A, torre de ordenador, portátil y calefactor.

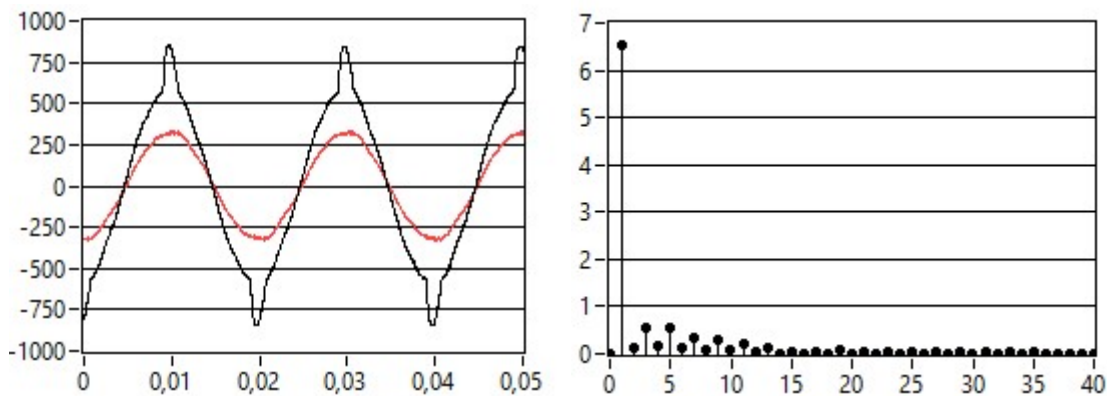


Figura 9-16. Tensión e Intensidad(x100) frente a tiempo y espectro armónico de intensidad en experimento A, torre de ordenador, portátil y calefactor.

A pesar de haber seleccionado la potencia menor, el calefactor tiene una potencia muy superior a las otras dos cargas juntas, por lo que el THDi obtenido es tan solo del 11,6%, apreciándose únicamente una ligera distorsión en las crestas y los valles. El THDv es del 2,69%. Las lecturas obtenidas son las de la tabla 9-15.

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
230,24	4,68	1120	225,8	4,6	1030
230,04	4,68	1118	225,3	4,6	1030
229,57	4,68	1117	225,6	4,6	1030
229,69	4,67	1116	225,7	4,6	1030
229,25	4,67	1112	225,8	4,6	1030

Tabla 9-15 Lecturas en experimento A, torre de ordenador, portátil y calefactor.

Las lecturas son muy similares en cada caso, aunque la lectura más alta de potencia en LabVIEW sea 8 W superior a la más baja, al tratarse de potencias altas la desviación en porcentaje es mínima. Las lecturas en el contador son menores en todos los casos. Las medidas resultantes son las de la tabla 9-16.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	229±10	4,68±0,20	1117±69
Medida en contador	225,64±0,27	4,600±0,057	1030,0±5,7

Tabla 9-16. Medidas en experimento A, , torre de ordenador, portátil y calefactor.

La potencia medida por el contador en el rango superior es inferior al rango inferior de la potencia en LabVIEW, por lo que según este experimento el contador estaría midiendo de forma errónea.

## 10 EXPERIMENTO B

En este experimento se pretende un estudio más sistemático del posible efecto de los armónicos en la medida de potencia del contador. Para ello se ha empleado el ordenador como carga no lineal y las seis resistencias de la imagen conectadas en serie entre sí como carga lineal; de forma que conectando el ordenador en paralelo con estas resistencias, y variando el número de las mismas se consigue que la distorsión armónica del ordenador sea más o menos eclipsada por la componente fundamental de la carga constituida por las resistencias.

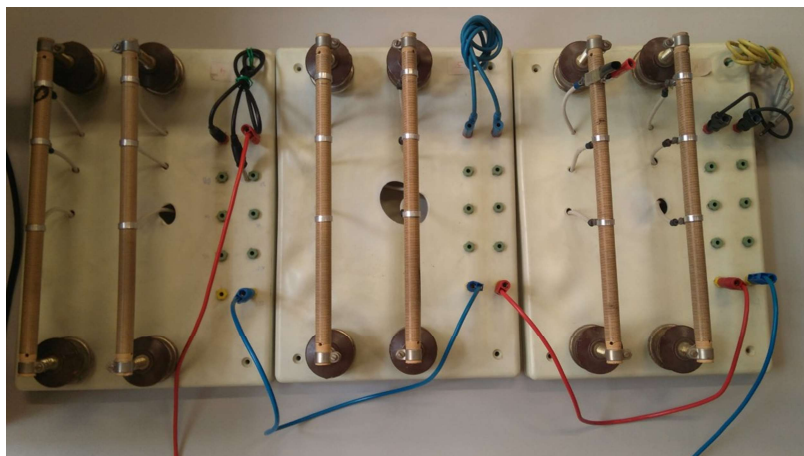


Figura 10-1. Banco de resistencias del experimento B.

Se ha procedido de manera análoga al experimento A. La THD<sub>v</sub> es similar en todos los casos y no se ha considerado de interés su inclusión en este apartado, sin embargo se puede extraer de las capturas de LabVIEW del anexo. Las lecturas para cada carga y las medidas resultantes se exponen a continuación:



### 10.1. Torre de ordenador.

La carga conectada al circuito del experimento es una torre de ordenador. Las lecturas y las medidas resultantes se presentan en las tablas 10-1 y 10-2.

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
231,4	0,57	67	228,1	0,5	60
231,87	0,57	67	227,9	0,5	60
232,15	0,57	67	228	0,5	70
232,72	0,58	67	228,5	0,5	70
232,25	0,58	67	226,9	0,5	60

Tabla 10-1. Lecturas en experimento B, 0 resistencias.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	232±10	0,574±0,026	67,0±4,2
Medida en contador	227,88±0,74	0,500±0,057	64,0±7,9

Tabla 10-2. Medidas en experimento B, 0 resistencias.

THDi: 143%

Los resultados para esta carga se han añadido tomándolos del experimento anterior, la THDi en este caso es muy superior a los otros casos debido a que las resistencias constituyen una carga considerable aun estando las seis en serie.

## 10.2. Torre de ordenador y 6 resistencias.

La carga conectada al circuito del experimento es una torre de ordenador y seis resistencias en serie. Las lecturas y las medidas resultantes se presentan en las tablas 10-3 y 10-4.

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
231,80	1,02	220	228,4	1,0	200
231,81	1,02	221	228,3	1,0	200
231,40	1,02	220	228	1,0	200
231,86	1,02	220	228,7	1,0	200
231,88	1,02	221	228,2	1,0	200

Tabla 10-3. Lecturas en experimento B, 6 resistencias.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	232±10	1,020±0,044	220±14
Medida en contador	228,32±0,33	1,000±0,056	200,0±5,7

Tabla 10-4. Medidas en experimento B, 6 resistencias.

THDi: 52,97%

Las resistencias en paralelo con el ordenador aumentan considerablemente la potencia y reducen la THDi como era de esperar al ser una carga completamente lineal. LabVIEW ofrece medidas superiores igual que en el experimento A, en este caso la incertidumbre no nos permite asegurar que el contador dé una medida errónea.

### 10.3. Torre de ordenador y 5 resistencias.

La carga conectada al circuito del experimento es una torre de ordenador y cinco resistencias en serie. Las lecturas y las medidas resultantes se presentan en las tablas 10-5 y 10-6.

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
233,19	1,15	255	229,6	1,1	240
232,79	1,14	255	229,4	1,1	240
232,82	1,14	254	229,5	1,1	230
232,82	1,14	254	230	1,1	240
232,25	1,15	254	229,8	1,1	230

Tabla 10-5. Lecturas en experimento B, 5 resistencias.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	233±10	1,144±0,050	254±16
Medida en contador	229,66±0,31	1,100±0,057	236,0±7,9

Tabla 10-6. Medidas en experimento B, 5 resistencias.

THDi: 46,76%

La THDi baja al reducirse la resistencia de la carga, ya que esto produce un aumento de potencia de la carga lineal según la ley de Ohm:  $P=V^2/R$ , la tensión de la red no se modifica.

#### 10.4. Torre de ordenador y 4 resistencias.

La carga conectada al circuito del experimento es una torre de ordenador y cuatro resistencias en serie. Las lecturas y las medidas resultantes se presentan en las tablas 10-7 y 10-8.

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
232,98	1,31	299	229,4	1,3	280
232,71	1,31	298	229,3	1,3	280
232,42	1,31	298	229,5	1,3	280
232,58	1,31	298	229,2	1,3	280
232,67	1,31	299	229,4	1,3	280

Tabla 10-7. Lecturas en experimento B, 4 resistencias.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	233±10	1,310±0,057	298±18
Medida en contador	229,36±0,14	1,300±0,057	280,0±5,7

Tabla 10-8. Medidas en experimento B, 4 resistencias.

THDi: 38,10%

La THDi continúa bajando, y como en todos los casos las medidas en LabVIEW son superiores. Los intervalos en los que se encuentra la potencia según un instrumento y otro coinciden en una fracción.

### 10.5. Torre de ordenador y 3 resistencias.

La carga conectada al circuito del experimento es una torre de ordenador y tres resistencias en serie. Las lecturas y las medidas resultantes se presentan en las tablas 10-9 y 10-10.

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
233,20	1,62	376	230	1,6	350
233,33	1,60	377	229,9	1,6	350
233,64	1,60	378	229,5	1,6	350
233,25	1,62	376	230,3	1,6	350
233,70	1,60	378	230,1	1,6	350

Tabla 10-9. Lecturas en experimento B, 3 resistencias.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	233±10	1,608±0,071	377±23
Medida en contador	229,96±0,38	1,600±0,057	350,0±5,7

Tabla 10-10. Medidas en experimento B, 3 resistencias.

THDi: 32,05%

La THDi continúa bajando, y como en todos los casos las medidas en LabVIEW son superiores. Los intervalos en los que se encuentra la potencia según un instrumento y otro coinciden en una fracción.

### 10.6. Torre de ordenador y 2 resistencias.

La carga conectada al circuito del experimento es una torre de ordenador y dos resistencias en serie. Las lecturas y las medidas resultantes se presentan en las tablas 10-11 y 10-12.

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
232,36	2,23	530	229,3	2,1	480
232,8	2,21	525	229,3	2,2	490
232,81	2,24	532	229,2	2,2	490
232,54	2,22	527	229,1	2,2	490
232,43	2,23	528	229,5	2,1	480

Tabla 10-11. Lecturas en experimento B, 2 resistencias.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	233±10	2,226±0,098	528±33
Medida en contador	229,28±0,19	2,160±0,079	486,0±7,9

Tabla 10-12. Medidas en experimento B, 2 resistencias.

THDi: 21,3%

La THDi continúa bajando, y como en todos los casos las medidas en LabVIEW son superiores. Los intervalos en los que se encuentra la potencia según un instrumento y otro no coinciden en este caso, siendo el menor valor para la potencia según LabVIEW 495 W y el mayor valor para la potencia según el contador 493,9 W. Recordemos que estos intervalos están asegurados al 95% para la t de Student empleada.

### 10.7. Torre de ordenador y 1 resistencia.

La carga conectada al circuito del experimento es una torre de ordenador y seis resistencias en serie. Las lecturas y las medidas resultantes se presentan en las tablas 10-13 y 10-14.

Lecturas en LabVIEW			Lecturas en el contador		
Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
232,56	4	968	229,1	3,8	870
232,48	3,98	967	230,3	3,8	880
232,71	4,01	968	229,4	3,8	870
232,36	4,02	968	229,8	3,8	870
232,51	3,99	967	230,0	3,8	880

Tabla 10-13. Lecturas en experimento B, 1 resistencia.

	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (W)
Medida en LabVIEW	233±10	4,00±0,18	968±60
Medida en contador	229,72±0,60	3,800±0,057	874,0±7,9

Tabla 10-14. Medidas en experimento B, 1 resistencia.

La THDi continúa bajando, y como en todos los casos las medidas en LabVIEW son superiores. Los intervalos en los que se encuentra la potencia según un instrumento y otro vuelven a no coincidir en este caso, siendo el menor valor para la potencia según LabVIEW 908 W y el mayor valor para la potencia según el contador 881,9 W.

### 10.8. Gráficas del experimento B.

A continuación están representadas las gráficas de tensión e intensidad frente a tiempo de cada experimento, así como las del espectro armónico en cada caso. Las capturas del panel de control de LabVIEW se adjuntan en el anexo del experimento, aunque la información más relevante es la de estas gráficas.

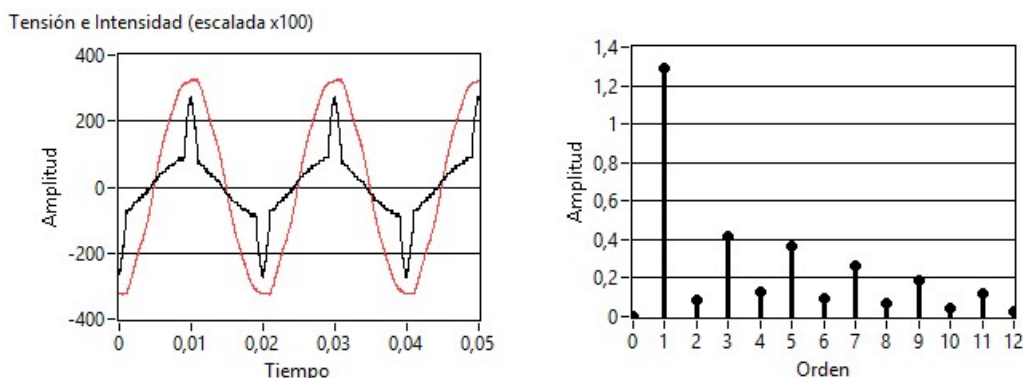


Figura 10-2. Experimento B con 6 resistencias.

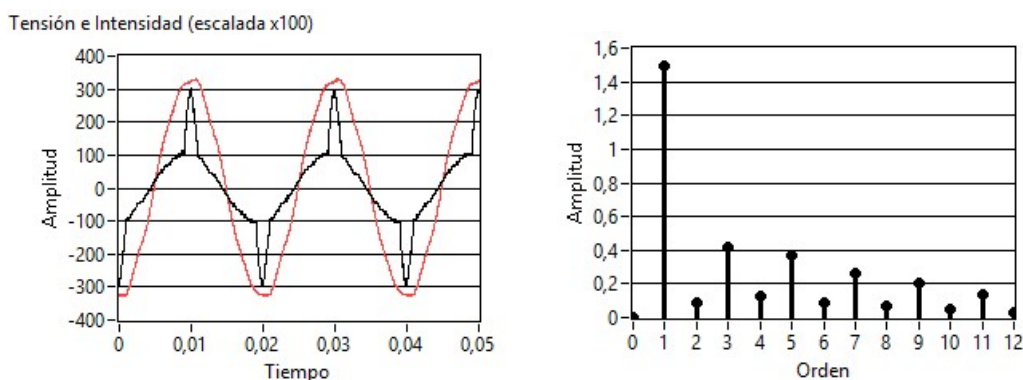


Figura 10-3. Experimento B con 5 resistencias.

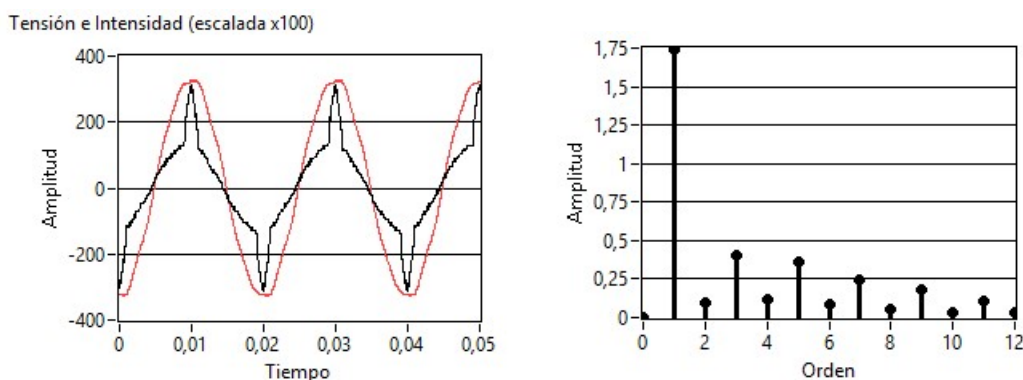


Figura 10-4. Experimento B con 4 resistencias.



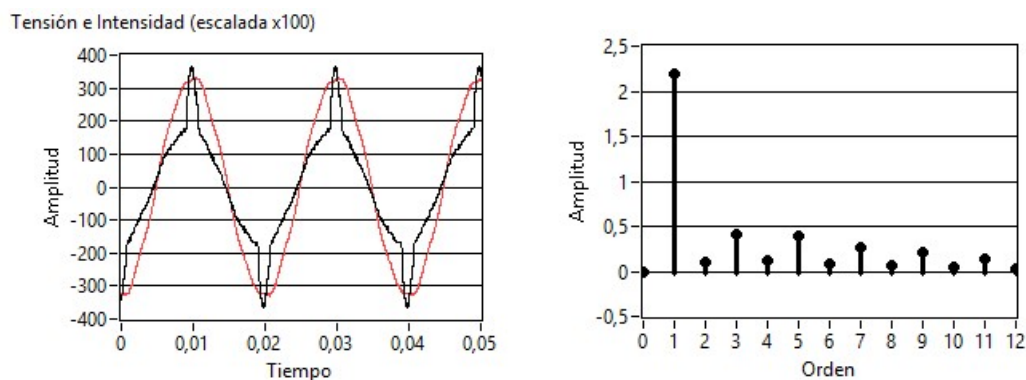


Figura 10-5. Experimento B con 3 resistencias.

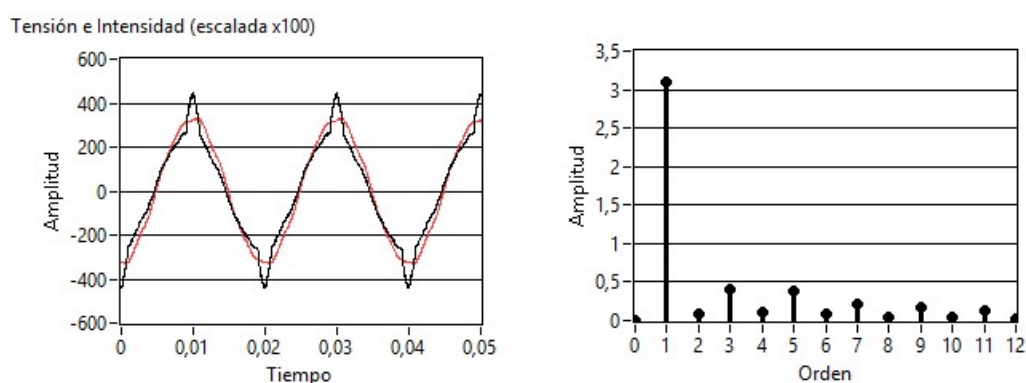


Figura 10-6. Experimento B con 2 resistencias.

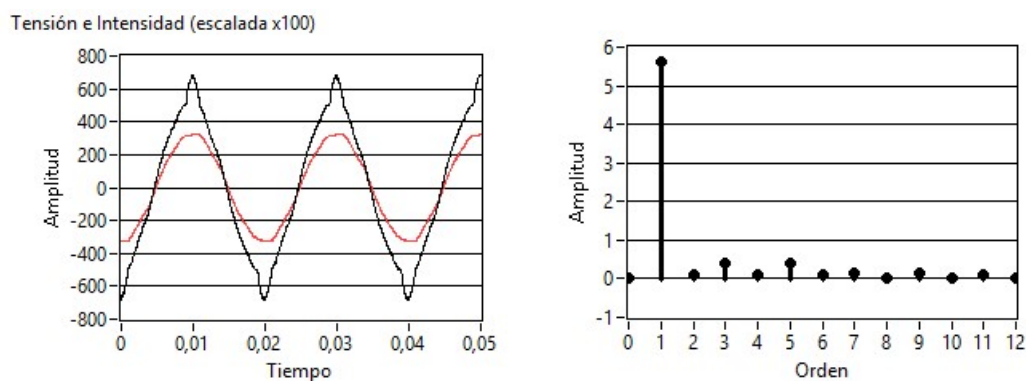


Figura 10-7. Experimento B con 1 resistencia.

En la gráfica de tensión e intensidad se observa que la tensión es una senoide perfecta y que la intensidad se va aproximando a una senoide al reducir el número de resistencias, esto es debido a que la componente fundamental de intensidad es cada vez superior, mientras que las componentes armónicas se mantienen constantes. Esto se puede ver en las gráficas del espectro armónico, en el que la fundamental es de 2,5 A en el caso de 6 resistencias y va subiendo al añadir cada resistencia hasta alcanzar los 5,5 A con 1 resistencia; las componentes armónicas se mantienen constantes y se comprueba cómo van siendo más despreciables conforme la escala varía.

# 11 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

---

En todos los casos de los experimentos realizados se han obtenido valores superiores de potencia en las medidas a partir de las lecturas LabVIEW que en las del contador CERM1 estudiado, esto es en parte causado por una falta de veracidad del osciloscopio. Se ha comprobado experimentalmente que ofrece una tensión más elevada de lo que debería tanto para la pequeña tensión a diferentes frecuencias inyectada con el generador de ondas como para la tensión de la red comparada con el multímetro digital. En ambos casos se estimó un error de aproximadamente el 2,5%, sin embargo, en el cálculo de la incertidumbre se prefirió tomar el error ofrecido por el manual del osciloscopio, más elevado que el estimado para una mayor seguridad y rigurosidad.

Debido a esta incertidumbre en la gran mayoría de los casos no se puede asegurar que el contador ofrezca una información errónea, pero en los casos de cargas elevadas los intervalos de ambos instrumentos dejan de compartir valores, por lo que sí es razonable afirmar que el contador ensayado en el laboratorio se aleja algo de la medida real por debajo. Esto ocurre en cargas elevadas debido a que la falta de resolución del contador, que muestra diferencias de 10 W como mínimo solamente, tiene menos peso a elevadas cargas como es lógico.

Para cada experimento se ha estudiado si la diferencia porcentual entre el valor medido (sin tener en cuenta la incertidumbre) con un instrumento y otro varía en relación con otra variable, especialmente la distorsión armónica total de intensidad, ya que la tensión se mantiene constante.

## 11.1 Experimento A.

En primer lugar se ha representado la diferencia porcentual de potencias en el eje Y frente a la THDi en el eje X. El resultado es el de la figura 11-1.

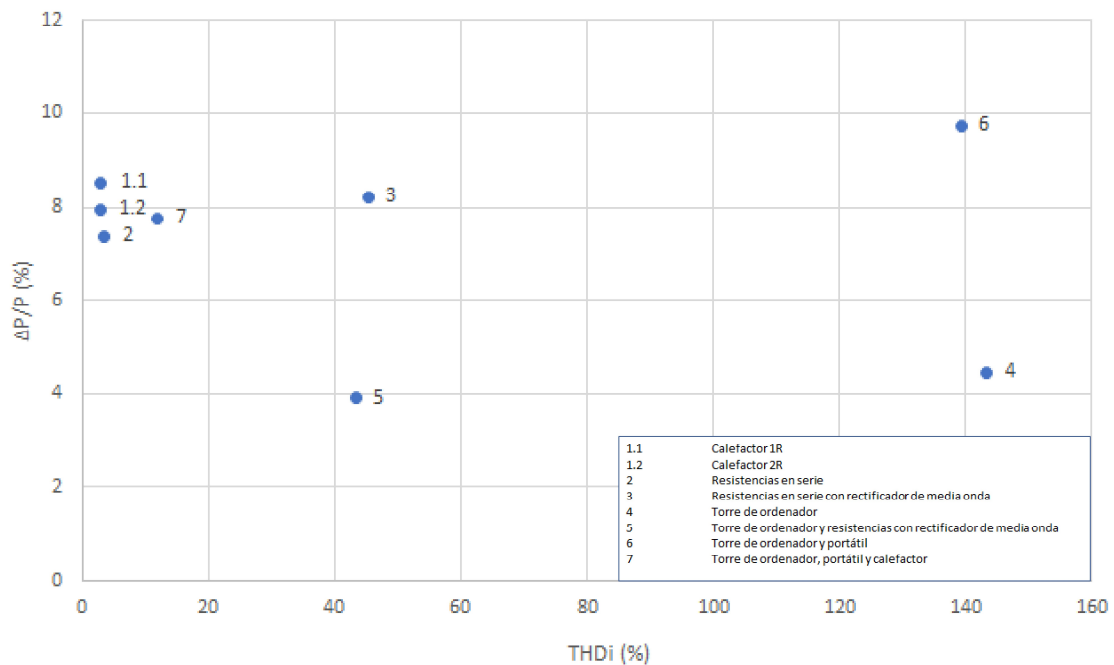


Figura 11-1. Gráfica  $\Delta P/P$ -THDi del experimento A.

La nube de puntos no se ajusta a ninguna línea de tendencia, ya que la mayoría de los valores se encuentra cerca de una diferencia del 8%, pero hay dos cargas muy alejadas de este valor y con diferente THDi. La primera de estas cargas es la torre de ordenador y las resistencias con rectificador de media onda, que tiene una diferencia del 4% con un THDi similar al de las resistencias con rectificador sin ordenador. El otro caso con una baja diferencia es el del ordenador por separado, por lo que se podría pensar que es el causante de esta desviación respecto a la mayoría de valores; sin embargo, en los dos casos en los que se ha estudiado el ordenador con el portátil sí que se encontraba alrededor del 8%.

En segundo lugar, se ha representado en la figura 11-2 la diferencia porcentual frente a la potencia medida en el LabVIEW, la representación frente a la potencia en el contador es similar.

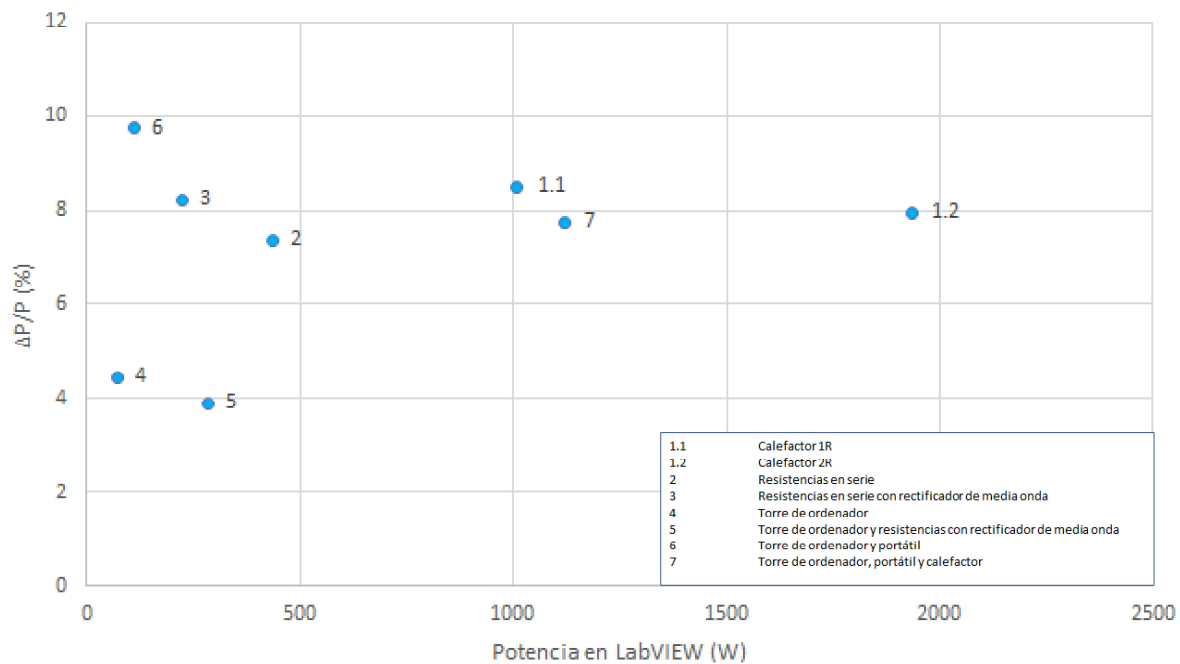


Figura 11-2. Gráfica  $\Delta P/P - P_{\text{LabVIEW}}$  del experimento A.

En este caso tampoco se ajusta a ninguna línea de tendencia, los puntos con una diferencia porcentual de alrededor del 4% tienen potencia similar a otros con mucha mayor diferencia porcentual.

Con este experimento no se puede relacionar el error cometido por el contador con ninguna variable, ya que parece bastante aleatorio, sin embargo, las cargas utilizadas son combinaciones de los mismos elementos, lo que podría alterar los resultados.

## 11.2 Experimento B.

Con este experimento se ha intentado disponer de una carga variable más controlada que las cargas del experimento anterior, por lo que los puntos en ambas gráficas están más ordenados en el eje X.

La primera de las gráficas al igual que en el experimento A representa la diferencia porcentual de potencias en el eje Y frente a la THDi en el eje X, en la figura 11-3.



Figura 11-3. Gráfica  $\Delta P/P$ -THDi del experimento A.

Los puntos se encuentran alrededor del 8%, presentando un mínimo para 4 resistencias al que se acercan los puntos de forma progresiva desde ambos lados, no se ha encontrado justificación a esto, ya que en el experimento A hay dos cargas (puntos 3 y 5) en el rango de THDi de 40% a 50% con un  $\Delta P/P$  muy diferente. El ordenador sin resistencias se volvió a comprobar debido al bajo error en comparación con el conjunto de puntos en ambos experimentos, dando unos resultados similares.

Después se ha procedido de forma análoga al experimento A representando en la figura 11-4 la diferencia porcentual frente a la potencia medida en LabVIEW.

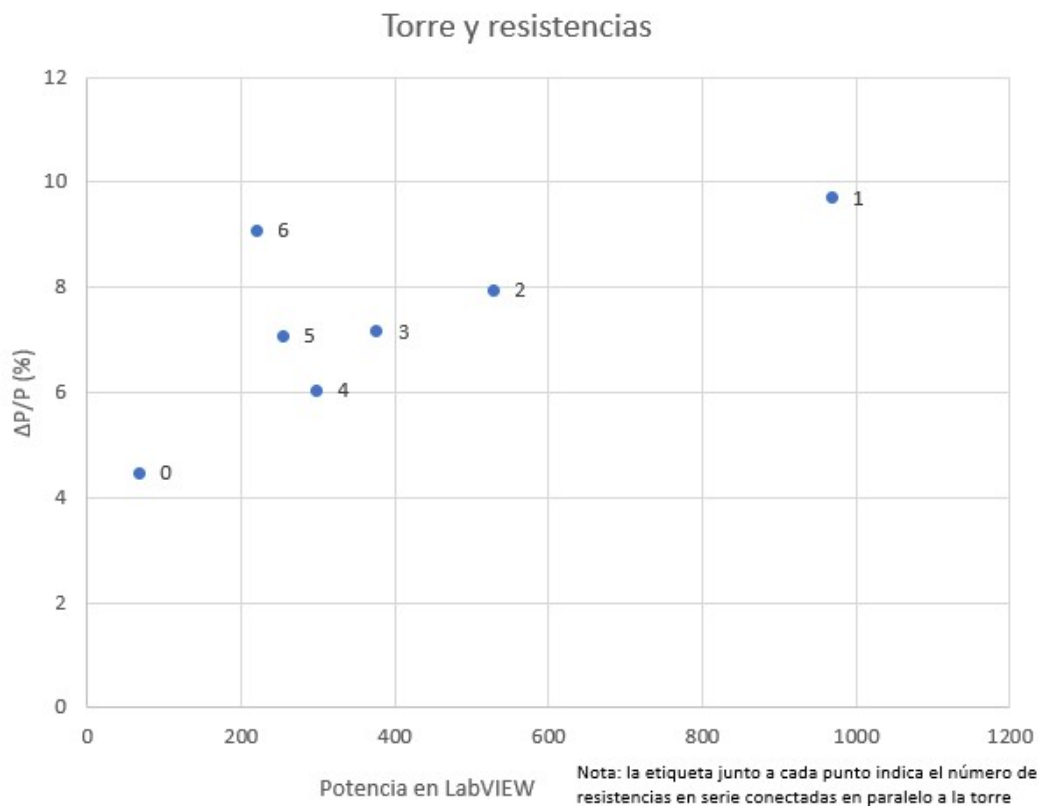


Figura 11-4. Gráfica  $\Delta P/P$ - $P_{\text{LabVIEW}}$  del experimento A.

La forma de los puntos es similar a la anterior gráfica debido a que en este experimento la potencia y la THDi están estrechamente relacionadas, por lo que no ofrece nueva información más allá de que se obtienen los resultados esperados para cada número de resistencias.

### 11.3 Conclusión y observaciones.

Aunque en el experimento B se intuye una curva, no se puede afirmar que el error en el contador siga esta tendencia en función de la distorsión armónica total o la potencia de la carga como se comprueba el experimento A. Este comportamiento puede deberse a la naturaleza de esta carga en concreto o al azar.

En general parece que el error en el contador no depende de ninguna variable y es bastante constante y aleatorio, además gran parte de la diferencia entre el osciloscopio y el contador es debido a que el osciloscopio sobreestima la tensión y por tanto también la intensidad, ya que lo que recibe de la sonda de intensidad es una tensión también. A pesar de esta falta de veracidad del osciloscopio se ha demostrado que el contador comete algo de error por defecto, aunque con un osciloscopio más preciso se obtendrá un error bastante más pequeño previsiblemente. Estos resultados son para este contador en concreto y no se puede afirmar que todos los del mismo modelo presenten la misma tendencia.

Cabe destacar que estos experimentos llevados a cabo están limitados por la disponibilidad de cargas en el laboratorio, la falta de veracidad del osciloscopio y la falta de información acerca de algunas de las variables; como por ejemplo la precisión de algunas funciones de LabVIEW, que se han probado con valores virtuales, pero no hay forma de comprobar por ejemplo que se extraiga el espectro armónico de forma precisa, aunque los resultados no dan motivos para pensar lo contrario.

Se puede mejorar la precisión de los resultados obtenidos con instrumentos mejores; que permitirían por ejemplo eliminar el divisor de tensiones a la entrada del contador o lo que es más importante, eliminar la tendencia al alza del osciloscopio. También facilitaría la obtención de resultados más concluyentes la disponibilidad de una mayor variedad de cargas no lineales, ya que las utilizadas en este caso se reducen a tres: la torre de ordenador, el portátil y la resistencia con rectificador de media onda, la cual además es poco parecida a lo que se conecta habitualmente a un contador de estas características.

# ANEXO A. CAPTURAS DEL EXPERIMENTO B

En este anexo se adjuntas todas las capturas de las señales en LabVIEW del experimento B, con las formas de onda, los espectros armónicos, las tasas de distorsión armónica, los valores RMS y la potencia en una de las lecturas para cada situación.

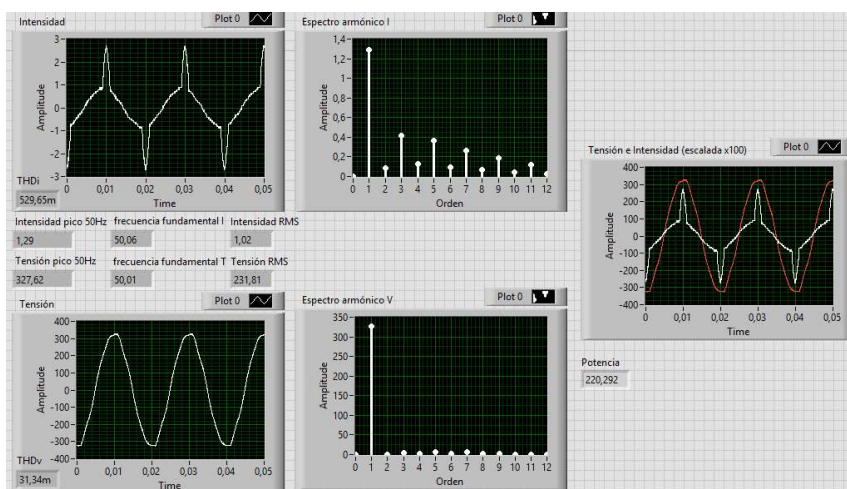


Figura A-1. Captura en LabVIEW para ordenador y 6 resistencias.

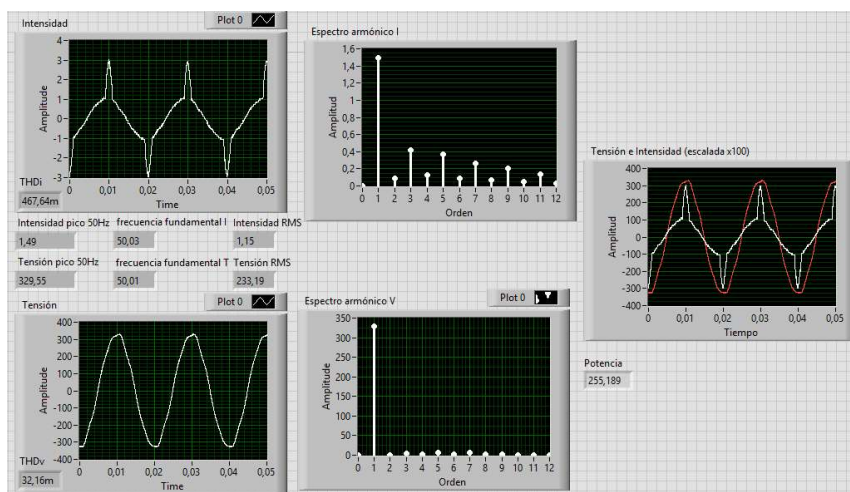


Figura A-2. Captura en LabVIEW para ordenador y 5 resistencias.



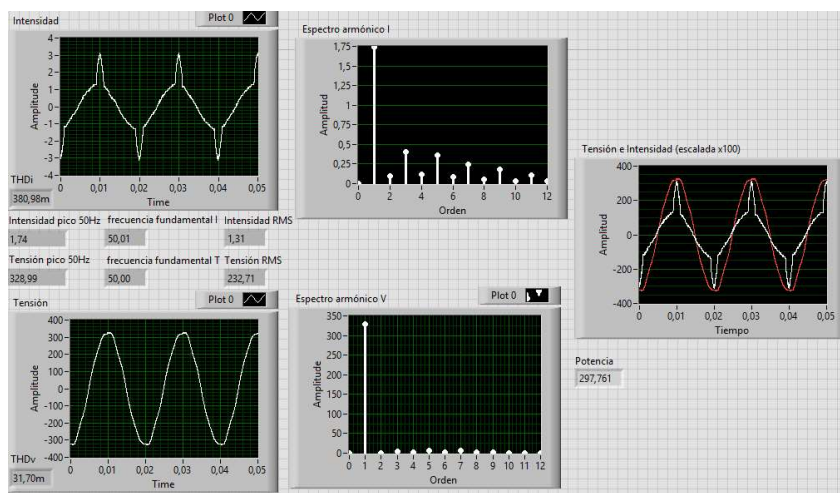


Figura A-3. Captura en LabVIEW para ordenador y 4 resistencias.

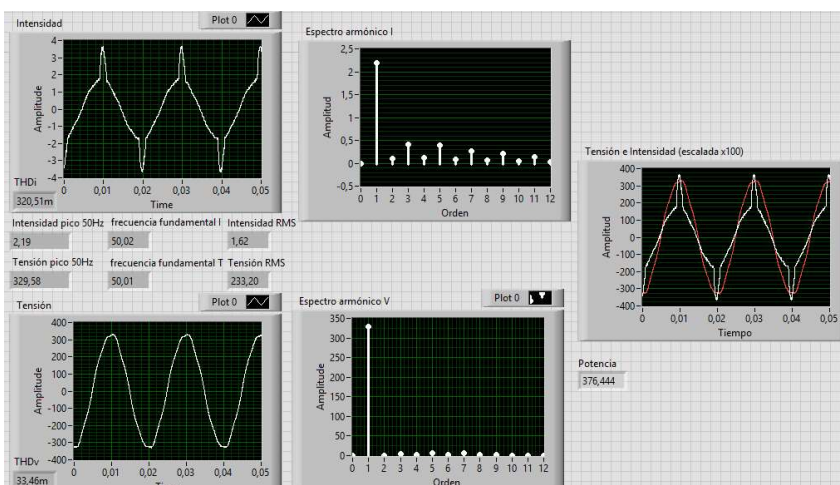


Figura A-4. Captura en LabVIEW para ordenador y 3 resistencias.

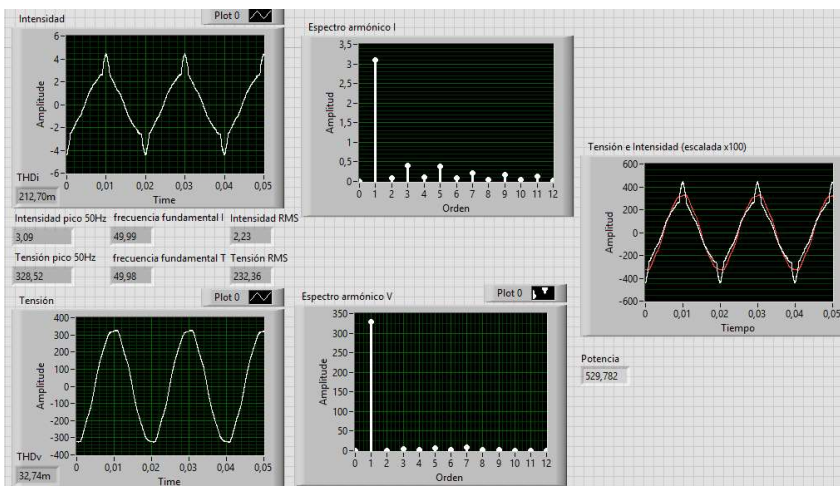


Figura A-5. Captura en LabVIEW para ordenador y 2 resistencias.

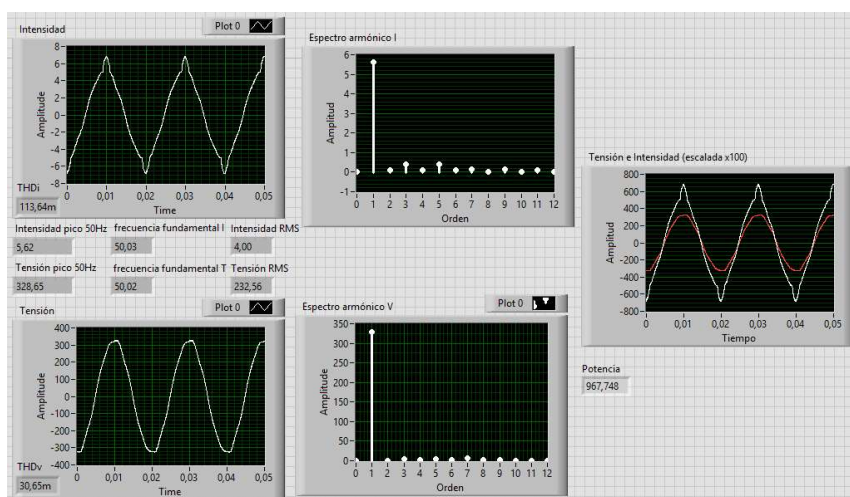


Figura A-6. Captura en LabVIEW para ordenador y 1 resistencia.

## REFERENCIAS

---

- [1] UNE-EN 61000-2-2:2003 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-2: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión.
- [2] UNE-EN 61000-3-2:2014 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada  $\leq 16$  A por fase).
- [3] CEI 61000-3-4:1998 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-4: Límites. Limitación de las emisiones de corrientes armónicas en las redes de baja tensión para equipos con corriente asignada superior a 16 A.
- [4] Real Decreto 889/2006, de 21 de julio, por el que se regula el control metrológico del Estado sobre instrumentos de medida, publicado en el BOE número 183, publicado el 2 de agosto de 2006. pp 28844- 28880.
- [5] Orden IET/290/2012, de 16 de febrero, por la que se modifica la Orden ITC/3860/2007, de 28 de diciembre, por la que se revisan las tarifas eléctricas a partir del 1 de enero de 2008 en lo relativo al plan de sustitución de contadores, publicada en el BOE núm. 44, de 21 de febrero de 2012, pp 15210-15212.

## BIBLIOGRAFÍA

AIM-TTi, TG1010A Programmable 10MHz DSS Function Generator, Instruction manual, Thurlby Thandar Instruments, [ Disponible en : [http://resources.aimtti.com/manuals/TG1010A\\_Instruction\\_Manual-Iss11.pdf](http://resources.aimtti.com/manuals/TG1010A_Instruction_Manual-Iss11.pdf)]

BAGGINI, A.(2008), Handbook of Power Quality, Wiley Ed., 642 pp.

CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA(2008), Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. Ministerio de Industria Comercio y Turismo, 132 pp. [Disponible en: <http://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>]

CHAPMAN, D. (2001), “Armónicos. Causas y Efectos”, en LEONARDO POWER QUALITY INICIATIVE,. Guía de Calidad de la Energía Eléctrica, pág. 1-16. [Disponible en: <http://www.cmdearcos.es/wp-content/uploads/2013/04/Guia-Calidad-3-1-Armonicos.pdf>]

COLLOMBET, C., LUPIN, J.M. y SCHONEK, J. (1999) “Harmonic disturbances in networks, and their treatment., Cahier Technique Merlin Gerin, 1(152), 1-31.

DANFOSS (2011) Harmonic Distortion of the AC Power Line, White Paper, Danfoss Group. [Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Arun\\_Khilnani/post/Why\\_there\\_are\\_even\\_Harmonics\\_in\\_my\\_current\\_waveforms/attachment/59d61de079197b807797b9ac/AS%3A273794072023046%401442289003269/download/HarmonicDistortionoftheACPowerLine.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Arun_Khilnani/post/Why_there_are_even_Harmonics_in_my_current_waveforms/attachment/59d61de079197b807797b9ac/AS%3A273794072023046%401442289003269/download/HarmonicDistortionoftheACPowerLine.pdf)]

ENEL DISTRIBUZIONE S.P.A. (Sin fecha) Guía de uso. CERM 1. Contador Monofásico Multifunción De Telegestión, 8 pp. [Disponible en: [https://web.gencat.cat/web/shared/GENCAT/que\\_cal\\_fer\\_si/serveis\\_centrales/que\\_fer\\_quan\\_especials/queferquan/vull-consumir-energia-responsable/reduir-factura/model-facturacio-hores/Manual-CERM1-1.pdf](https://web.gencat.cat/web/shared/GENCAT/que_cal_fer_si/serveis_centrales/que_fer_quan_especials/queferquan/vull-consumir-energia-responsable/reduir-factura/model-facturacio-hores/Manual-CERM1-1.pdf)]

FLUKE CORPORATION (2006) Digital Multimeter Users Manual 8845A/8846A. Ed. Fluke Corporation, Everet, 93 pp. [Disponible en: . [http://assets.fluke.com/manuals/884xa\\_\\_\\_umeng0000.pdf](http://assets.fluke.com/manuals/884xa___umeng0000.pdf)]

RUIZ, S. ET AL )1996) Guía sobre la calidad de la onda en las redes eléctricas Grupo de Trabajo "Calidad de Onda" de UNESA, Unessa D.L.

TEJADA, A. y LLAMAS, A.(2010), Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos. Instituto Tecnológico de Monterrey, México. [ Disponible en: <http://www.mty.itesm.mx/decic/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/ueee/armonicas/07Efectarm.PDF>]

TEKTRONIC (2006) Series TDS2000C y TDS1000C-EDU Osciloscopios de almacenamiento digital. Manual del usuario, 169 pp.

[Disponible en: <https://weble.upc.edu/asig/EE/ManualTektronix.pdf>]

## WEBGRAFÍA

---

### FLUKE

Página web oficial del multímetro: [www.fluke.com](http://www.fluke.com)

### LabVIEW

Página web oficial de National Instruments, creador de LabVIEW: [www.ni.com](http://www.ni.com)

### TEKTRONIX

Página web oficial de Tektronix, marca del osciloscopio: [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)

## GLOSARIO

---

A: Amperios, unidad de intensidad.

cos: coseno.

CEM: Centro Español de Metrología.

f: frecuencia.

Hz: hercio, unidad de frecuencia.

I: Intensidad.

IEC: International Electrotechnical Commission.

IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers.

ISO: International Organization for Standardization.

kVAr: kilovoltioamperio reactivo, unidad de potencia reactiva.

kVArh: kilovoltioamperio reactivo, unidad de energía reactiva.

kW: kilowatio.

kWh: kilowatio·hora, unidad de energía eléctrica.

LV: LabVIEW

P: Potencia.

RMS: valor eficaz.

sen: seno.

T: Tensión.

THDi: Tasa de distorsión armónica de intensidad.

THDv: Tasa de distorsión armónica de tensión.

UNE: Una Norma Española.

VI: instrumento virtual en LabVIEW.

V: Voltios, unidad de tensión.

W: Watios, unidad de potencia.

$\phi$ : desfase entre tensión e intensidad